

陇东合水县塬梁峁地貌分类及演化

袁爽, 许强, 赵宽耀, 王绚, 王崔林

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 黄土地貌是按独特的演化模式形成当今复杂多样且有序分异的地貌形态组合。基于数学形态法将合水县地区黄土地貌分类并计算得出塬梁峁地貌单元的分类指标, 再通过黄土地貌单元的形态特征及分类指标, 对黄土塬梁峁地貌演化模式作出定量化和可视化表达, 并预测塬即将消失的区域。研究发现: ① 似圆度是界定黄土地貌单元演化进程的重要指标, 黄土地貌单元在演化过程中, 其形状规律程度逐渐增加; 可用周长面积比和平均坡度界定塬梁的分界, 可用边界临接指数界定梁峁的分界。② 塬向梁演化实质就是残塬向树杈梁演化。残塬是人类赖以生存的地貌单元, 是固沟保塬工程的重点实施对象。

关键词: 陇东地区; 数学形态法; 黄土地貌单元分类指标; 黄土地貌演化

DOI: 10.11821/dljy020190988

1 引言

大规模的城镇建设和农业发展带来的沟道侵蚀和水土流失问题日益严重, 黄土台塬已支离破碎, 部分地段甚至已将塬区瓦解。黄土高原地质环境本身异常脆弱, 近年来一系列重大工程建设(如平山造城、治沟造地、固沟保塬等)其作用速度和强度远超地质营力, 对地质环境产生重大影响, 并导致灾变不断发生。黄土地貌是经过几百万年的黄土堆积, 在风力和水力交互作用下侵蚀搬运, 按特有的发育模式形成的复杂多样且有序分异的地貌形态组合^[1-3]。研究黄土塬梁峁的分类可以帮助了解黄土地貌的演变, 对预防人类赖以生存的黄土塬演化消失具有重要意义^[4,5]。研究黄土塬梁峁的演化模式, 更是利于人们正确认识塬是如何一步一步演化消失的, 这为工程治理提供了更多的依据。故本文通过对合水县黄土地貌分类及地貌演化模式的定量化和可视化表达, 得出塬即将消失的区域, 为固沟保塬工程的实施提供指导。

数学形态学是一门建立在严格数学理论基础上的学科, 其基本思想和方法对图像处理的技术产生了重大影响。数学形态学已经构成一种新的图像处理方法和理论, 成为计算机数字图像处理及分形理论的一个重要研究领域, 并且已经应用在多门学科的数字图像分析和处理的过程中^[6], 前人运用数学方法已经对黄土地形地貌^[6]、植被空间分布^[7-9]以及城市土地利用做了详尽的研究^[10]。在黄土地貌分类方面, 学者们也从不同尺度对地貌类型区划分^[11]、地貌类型分类^[12,13]和地貌单元分类^[6,14]做了详尽的研究。在以往的黄土地貌研究中, 前人多从沟头侵蚀^[15-20]和侵蚀产沙^[21,22]入手来研究地貌的改变, 而随着技

收稿日期: 2019-11-13; 修订日期: 2020-02-02

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41790445); 国家自然科学基金重点项目(41630640); 国家创新研究群体科学基金项目(41521002)

作者简介: 袁爽(1996-), 男, 四川成都人, 硕士生, 主要从事地质灾害研究。E-mail: yuan980170290@qq.com

通讯作者: 许强(1968-), 男, 四川巴中人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害预测评价及防治处理方面的教学与研究。E-mail: xq@cudt.edu.cn

术的成熟和发展, 遥感手段已经成为人们了解地形地貌的一种基础手段^[23]。除此之外, 随着多学科交叉, 研究的思路被扩充到多个方向, 有人从考古学^[24]、气候变迁^[5,25-27]、水入渗^[28]、土地利用^[29,30]、人类活动^[31]等方面来研究地形地貌。黄土地貌类型的分布与下覆基岩有很大关系, 马乃喜指出基于现今黄土与下覆基岩的关系, 黄土地貌演化分为3个类型: 承袭型、改造型和后期演化型^[32], 而后熊礼阳基于钻孔数据反演的古地形DEM则很好的印证了现今黄土地貌是继承了古地貌的^[1-3], 从下覆基岩的角度出发有利于人们更好地了解地貌演化的进程^[33]。前人虽然已经将数学形态法应用于多个自然科学的研究, 但很少有人通过数学形态法研究黄土地貌演化; 陈燕等人虽提出了梁峁地貌单元的分类, 但其未提取塬的分类^[6]; 对于黄土地貌演化的研究, 前人在侵蚀产沙、沟头侵蚀、古地形等方面已经研究得十分透彻, 但对于黄土地貌演化的模式及预测研究仍不够详尽。

故本文基于数学形态学将合水县黄土塬梁峁地貌分类并建立黄土地貌单元分类指标, 通过黄土地貌单元的形态特征以及黄土地貌单元分类指标, 对黄土塬梁峁地貌演化模式作出量化及可视化表达, 并结合人地关系对塬即将消失的区域作出预测, 为防灾减灾作出贡献, 对合水县地区黄土地貌演化及土壤侵蚀研究具有一定的科学意义。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

研究区位于甘肃省东部庆阳市合水县(图1), 地处陇东黄土高原, 东邻陕西省富县, 西连庆城县, 南接宁县, 北靠华池县及陕西省志丹县, 东西长138 km, 南北宽80 km。东北部为丘陵沟壑区, 海拔1458~1682 m, 总土地面积2933.37 km²。西南部分为高原沟壑区, 海拔1190~1387 m, 系泾河上游地带, 境内有县川河、马莲河、固城河、葫芦河四条河流, 年入境平均总径流量3.67亿 m³, 水资源总量4.42亿 m³。全年总降水量408.2 mm, 年平均气温10.2℃。合水县区域内黄土塬梁峁地貌发育完整, 利于本文对黄土地貌演化的研究。

2.2 研究方法

首先基于2009年10月17日至2018年7月26日的3.88 m分辨率Google拼接遥感影像目视解译合水县地区并将研究区按照黄土地貌特征划分出塬、梁、峁地貌, 在前人研究的基础上^[6,12-14]根据影像斑块形状特征将“塬梁峁”地貌划分为大塬、残塬、树杈梁、长窄梁、短宽梁、不规则峁、线性峁、椭圆峁和似圆峁这九类黄土地貌单元(图2)。

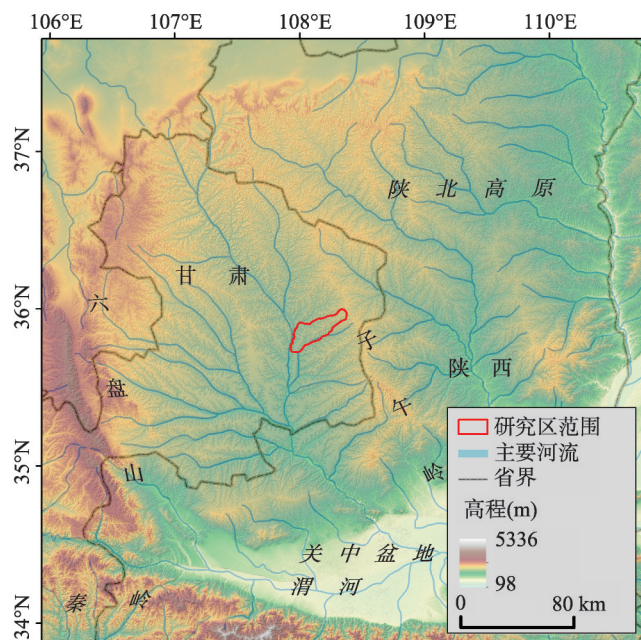


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

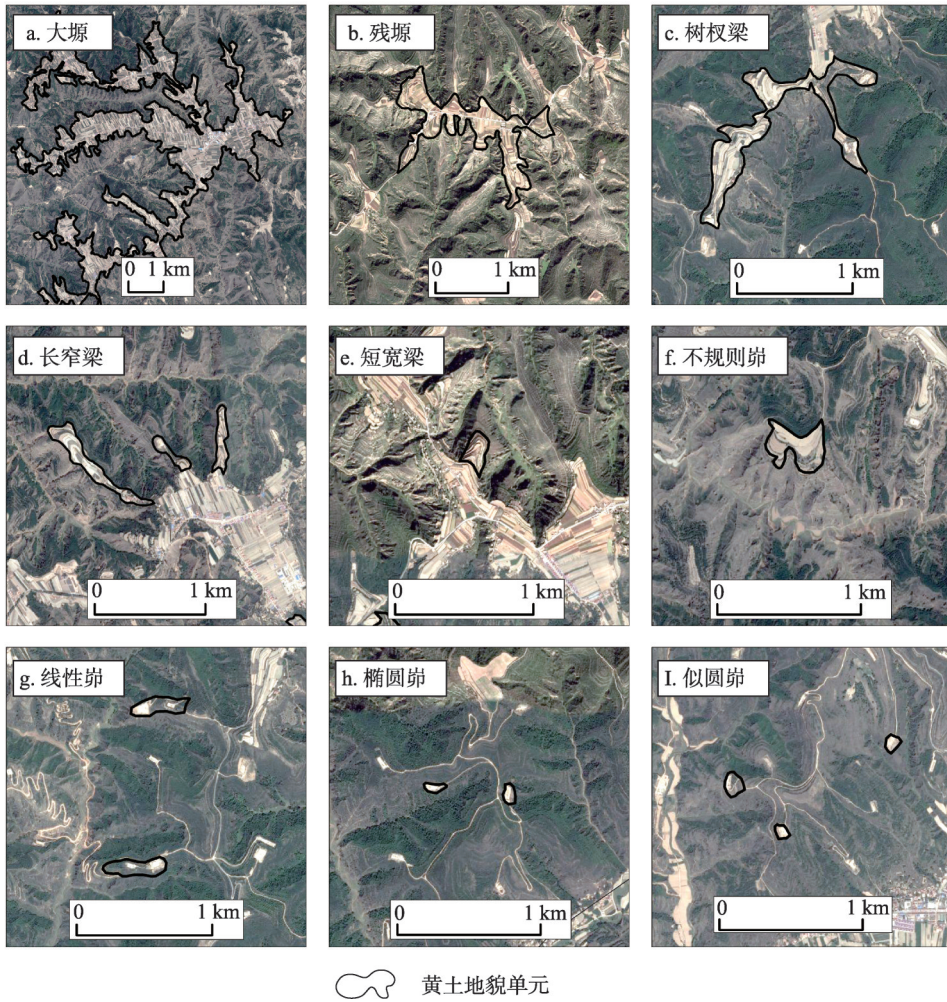


图2 黄土地貌单元与影像对照图

Fig. 2 Contrast of loess geomorphic unit and image

斑块形状是描述景观的一个重要的因子，斑块的几何形状是景观空间结构度量中另一个很重要的特征^[9]。本文基于数学形态法采取似圆度、周长面积比、平均坡度、边界维数和边界临接指数这5种形状指数将黄土地貌单元的形态特征量化。

(1) 似圆度（形状指数、斑块扩展度指数计测公式）

$$D_i = P_i / 2 \sqrt{\pi A_i} \tag{1}$$

式中： D_i 是斑块的似圆度； P_i 是斑块的周长； A_i 是斑块的面积。这个指数代表斑块形状与圆的相似程度，其最小值为1；值越接近1，表示斑块越接近圆形；值越大，形状越不规则^[6-9]。

(2) 周长面积比（斑块圆环度指数计测公式）

$$C_i = P_i / A_i \tag{2}$$

式中： C_i 是斑块的周长面积比； P_i 是斑块的周长； A_i 是斑块的面积。这个指数代表斑块周长与面积之比，表征斑块的边界效应。斑块面积越大，单位面积中的边界数量越少，斑块形状越不紧凑^[6-9]。

(3) 平均坡度

通过 Arcmap 10.3 软件的 Spatial Analyst Tools 提取每一个斑块的坡度, 再根据各个斑块所处的地貌单元类别计算各个地貌单元的平均坡度。

(4) 边界维数

$$FD_i = 2 \ln P_i / \ln A_i \quad (3)$$

式中: FD_i 是斑块的边界维数; P_i 是斑块的周长; A_i 是斑块的面积。这个指数表征斑块的分维, 表示斑块的复杂程度^[6-9]。

(5) 边界邻接指数

$$I_{ij} = l_{ij} / P_i \quad (4)$$

式中: I_{ij} 是斑块 j 对斑块 i 的边界邻接指数; l_{ij} 是斑块 i 和斑块 j 的公共边界长度; P_i 是斑块 i 的周长, 本文中指其他斑块对大塬或者残塬的边界邻接指数。通过分析景观的边界邻接指数, 可从不同斑块间公共边界的角度认识不同斑块或景观类型的空间关系, 揭示景观空间格局的空间邻接规律^[10]。

基于以上数学形态学公式提取的黄土地貌单元的形态特征值, 利用三分之二的数据总结归纳出黄土地貌单元分类指标, 并用余下三分之一的数据检验其精度可达 91.9%。再根据黄土地貌单元的形态演变分析得出黄土地貌塬、塬-梁、梁、梁-峁、峁的演化模式并作出定量化及可视化表达, 并从影像上找到其演化发生的实际例子, 增加可信度。

本文根据研究区内沟道走向与前人研究所获得的节理走向探讨研究区黄土地貌单元差异演化的原因。最后, 结合研究区居民点及道路的分布探讨了黄土地貌单元演化对人类生产生活的影响。

3 基于数学形态法的黄土地貌单元分类指标提取

3.1 黄土地貌单元分类

从图 3a 可知, 合水县南西部靠近黄土塬面积最大的董志塬, 以大片的黄土塬地貌为主, 地势较低, 以塬为主, 少有梁峁地貌, 属于演化的初期; 合水县中部塬面积变小, 梁峁地貌开始增多, 塬地貌与梁峁地貌发育持平, 开始进入演化的剧烈期; 合水县东北部临接子午岭, 这里的塬都已经演化成了残塬, 梁峁发育, 梁峁地貌占据主导地位, 已经到了演化的末期。

合水县区域共解译出塬地貌 18 个, 梁地貌 168 个, 峁地貌 72 个。根据影像斑块的形态特征并参考前人研究^[6,12-14], 将塬地貌根据面积大小和斑块形态, 分为大塬和残塬 (图 3b); 梁地貌根据组合形式和斑块形态, 分为树杈梁、长窄梁和短宽梁 (图 3c); 峁地貌根据斑块形态, 分为不规则峁、线性峁、椭圆峁和似圆峁 (图 3d)。

3.2 黄土地貌单元分类指标

根据前文罗列的五种数学形态学形状指数计算获得的黄土地貌单元形状特征部分数据如下 (表 1):

基于 172 个斑块 (三分之二的斑块) 的形状特征参数, 本文总结得出了合水县区域黄土地貌单元分类指标 (表 2), 并用余下的 86 个斑块进行检验精度, 发现有 79 个符合指标, 精度可达 91.9%。似圆度表示斑块的规则程度, 表 2 中似圆度随着演化程度的加深 (从大塬到似圆峁) 是不断降低的, 仅在塬梁分界 (残塬和树杈梁) 和梁峁分界 (短粗梁和不规则峁) 处出现相似, 这代表这黄土地貌是朝着越来越规则的方向演化。而似圆度

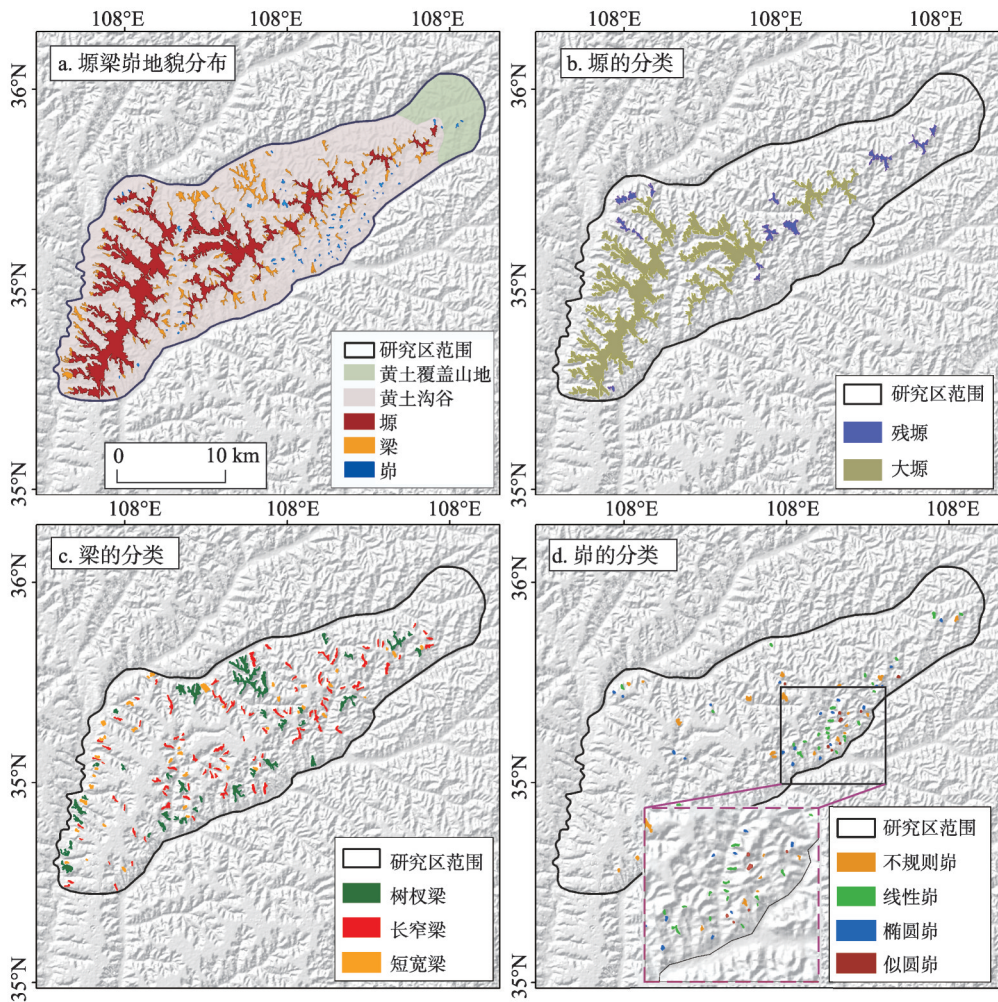


图3 黄土塬梁峁地貌及地貌单元分类分区

Fig. 3 Geomorphology of loess plateau-beam-loess hills and classification and division of geomorphic units

在塬梁分界和梁峁分界显示的相似性，代表了塬在向梁演化及梁在向峁演化的时候，黄土地貌单元形状的规律性是相似的。

在区分塬梁演化中的斑块是哪种类别的地貌单元时，周长面积比和平均坡度可以较好的发挥作用，但这两种形状指数在区别梁峁演化失效。在所有地貌单元里，边界维数是相似的，并不能很好的区别彼此。而边界临接指数可以有效区分梁峁演化中的斑块，是属于短粗梁还是不规则峁。

根据表2各形状指数所表现出来的规律，本文认为似圆度是界定黄土地貌单元演化进程的重要指标。在此基础上，可用周长面积比和平均坡度界定塬梁的分界，可用边界临接指数界定梁峁的分界。由此，可以将不同的黄土地貌单元准确区分开。

4 黄土塬梁峁地貌演化模式

黄土地貌演化的模式有多种，广泛认为的黄土地貌演化模式是，从黄土塬、到黄土

表1 黄土地貌单元形状特征部分数据

Tab. 1 Partial data of shape characteristics of loess geomorphological units

编号	似圆度 D_i	周长面积比 C_i	平均坡度	边界维数 FD_i	边界衔接指数 I_y	地貌单元类别
1	4.9252	10.8610	3.73	1.3874	0	大塬
2	4.9514	10.0746	4.27	1.3839	0	大塬
3	2.5688	9.8078	3.57	1.3233	0	残塬
4	2.3028	16.0399	3.60	1.3369	0	残塬
5	2.0933	19.1908	12.81	1.3364	-	树杈梁
6	2.5989	15.9970	14.36	1.3458	-	树杈梁
7	1.7417	14.3007	13.44	1.3000	-	长窄梁
8	1.6307	25.8786	12.76	1.3243	-	长窄梁
9	1.2717	18.6024	13.31	1.2742	0.10	短宽梁
10	1.2666	24.7066	14.96	1.2886	0.22	短宽梁
11	1.5288	39.7851	10.16	1.3438	0	不规则峁
12	1.4776	40.3049	12.92	1.3402	0	不规则峁
13	1.2502	34.3471	16.59	1.3063	0	线性峁
14	1.2637	29.1383	15.98	1.2978	0	线性峁
15	1.1934	22.9778	14.65	1.2765	0	椭圆峁
16	1.1335	39.8623	17.24	1.3014	0	椭圆峁
17	1.0590	23.3298	11.59	1.2603	0	似圆峁
18	1.0466	25.7919	15.35	1.2638	0	似圆峁

表2 黄土地貌单元分类指标

Tab. 2 Classification indicators of loess geomorphic units

分类	似圆度	周长面积比	平均坡度	边界维数	边界衔接指数	地貌
峁	1.05~1.10	23.0~45.0	-	1.26~1.30	0	似圆峁
	1.11~1.20	22.0~45.0	-	1.27~1.31	0	椭圆峁
	1.21~1.35	24.0~40.0	-	1.28~1.33	0	线性峁
	1.36~1.53	18.0~45.0	6.2~14.3	1.28~1.34	0	不规则峁
梁	1.25~1.53	20.0~35.0	7.2~16.1	1.27~1.33	0~0.3	短粗梁
	1.54~1.90	18.0~50.0	-	1.28~1.40	-	长窄梁
	1.91~2.88	15.1~32.3	5.2~14.6	1.30~1.38	-	树杈梁
塬	1.70~3.00	11.7~15.0	3.0~4.8	1.29~1.36	0	残塬
	3.81~5.12	6.7~11.2	-	1.37~1.42	0	大塬

梁、再到黄土峁,但近来的研究表明,并不是所有黄土高原地区的地貌演化都遵循这个模式,黄土塬也存在着塬边丘陵化和塬内沟谷分割直接成峁的情况等^[32]。黄土地貌类型的分布与下覆基岩有很大关系,作者认为下覆基岩对黄土地貌演化的作用有二点。其一,下覆基岩直接影响地貌。马乃喜指出黄土地貌演化分为三个类型:承袭型、改造型和后期演化型^[32]。这表明有的黄土地貌是基本继承了其下覆基岩的地貌特征的,这是由于黄土的直接堆积,黄土以披盖的方式将下覆基岩掩盖;也有的黄土地貌是与下覆基岩的地貌特征完全不同的,是经过流水侵蚀改造的;而后期演化型则如本文所示,由塬一直演化到峁。而熊礼阳基于钻孔数据反演的古地形DEM则很好的印证了现今黄土地貌是

继承了古地貌的,而且对古地貌的起伏性有缓和的作用^[2]。其二,下覆基岩的地质构造影响沟谷发育,间接控制地貌演化的进程。如本文讨论中所言,陇东地区的沟谷走向与姜琳对鄂尔多斯盆地调查的区域应力场的方向相同^[34]。基底断裂对黄土沟谷的发育具有一定的影响,而沟谷的发育则直接影响地貌的演化。

结合前文黄土地貌单元形态特征(似圆度、周长面积比、平均坡度和边界临接指数)的变化,尤其是似圆度所体现出来的“随黄土地貌单元的演化,似圆度不断减小”的特征(形状规律程度),本章节提出一种大塬逐渐向似圆塬演化的模式。同时,可从遥感影像上获取各个演化阶段所对应的实际地貌,验证演化模式的真实性和合理性。

4.1 塬的演化

起初黄土大塬呈现图4a中的地貌,塬面宽广完整,居民区、农田和林地均匀分布,在塬边会有少量的流水侵蚀;接下来,由于大型的构造作用,沟谷开始侵入塬面,居民区和农田开始向塬内部聚集,人类可支配面积减少(图4b);之后,沟谷彻底切穿塬面,将原先面积较大的塬分割成多个小塬,人类聚居地再次分散,同时塬边仍存有少量流水侵蚀(图4c);最后,构造运动结束,侵蚀作用占主导地位,小塬逐渐演化为残塬(图4d)。具体例子如图5a所示,原本西侧的残塬和东侧大塬是一块完整的塬,但一条走向近E-W的沟到将西侧的塬切割成三块残塬。

4.2 塬-梁的演化

塬向梁演化其实就是残塬(图6a)向树杈梁(图6b)演化,从表2中可以看出,残塬和树杈梁在似圆度上差别不大,而在平均坡度和周长面积比有较好的区分。故本文认为,残塬向树杈梁演化时,地貌单元的形状总体变化不大,演化具体体现在坡度的增大以及形态紧凑程度的提高(周长面积比变大)。具体例子如图5b所示,两块残塬连接部分的塬受南北两侧的沟道侵蚀而逐渐形成缓坡,最后演化成了树杈梁;与此同时,在残塬边缘一些受侵蚀较严重的部分也逐渐演化成树杈梁。

4.3 梁的演化

梁的演化与塬的演化有一定程度的相似,首先是在似圆度递减上的相似,其次是在由单一斑块到多个斑块的相似。完成塬梁演化后的树杈梁(图7a),在侵蚀作用下发生进

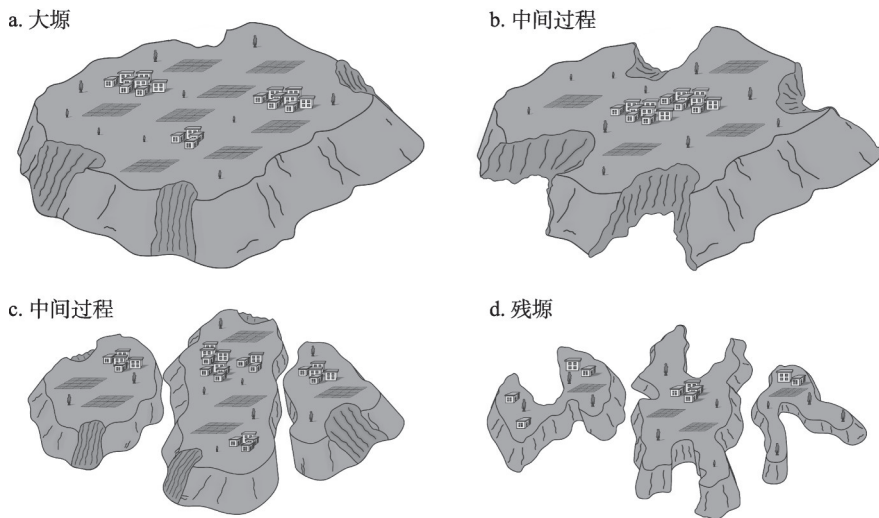


图4 塬的演化模式图

Fig. 4 Evolution model diagram of plateau

一步演化, 梁内薄弱地带侵蚀消失后, 树杈梁分解演化成多个长窄梁 (图 7b); 较长的长窄梁进一步分解, 较短的长窄梁侵蚀变短, 最后都演化成短宽梁 (图 7c)。具体例子如图 5b 所示, 西侧残塬的北部发育树杈梁, 南部发育长窄梁和短宽梁, 可以看出树杈梁如果进一步侵蚀则会被“修剪”侵蚀成长窄梁, 而长窄梁被侵蚀缩短就演化成成了短宽梁; 而在东侧残塬的北东部, 树杈梁已经近似分解, 从原先较大的树杈梁分解为一个较小的树杈梁和两个短宽梁。

4.4 梁-塬的演化

梁向塬演化其实就是短宽梁 (图 8a) 向不规则塬 (图 8b) 演化。从表 2 可得, 二者在除了边界临接指数上, 其他各指数均出现相似性。短宽梁和不规则塬在形状上是相似的, 而最大的区别就是与塬的临接性上。故本文认为, 短宽梁在向不规则塬演化时, 梁与塬的连接部分彻底断开, 形成相对独立的地貌单元塬, 同时塬的四周受到侵蚀, 面积和周长同时减小, 形态发生略微的变化。具体例子如图 5c 所示, 北侧的短宽梁是由残塬的边缘逐渐演化而成的, 其尚未与塬脱离接触; 而南侧不规则塬均已是独立的个体, 已经属于演化的末期。

4.5 塬的演化

塬作为黄土地貌演化的末期, 其演化的程度较小。随着似圆度不断减小, 不规则塬 (图 9a) 四周继续被侵蚀分割变成线性塬 (图 9b), 线性塬被侵蚀缩短形成椭圆塬 (图 9c), 最后椭圆塬进一步被侵蚀缩短演化成似圆塬 (图 9d)。具体例子如图 5c 所示, 塬的演化其实较为简单, 就是从不规则的形状受各个方向的侵蚀, 最后演化成近圆形。

5 讨论与结论

5.1 讨论

陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部, 其西部为天环拗陷, 并与西缘冲断构造带相邻, 东部为陕北斜坡的西南部, 南部与渭北隆起区相邻^[35]。合水县区域被西侧近 N-S 走向的马莲河及南北各一条近 NEE-SWW 走向的古河沟所切

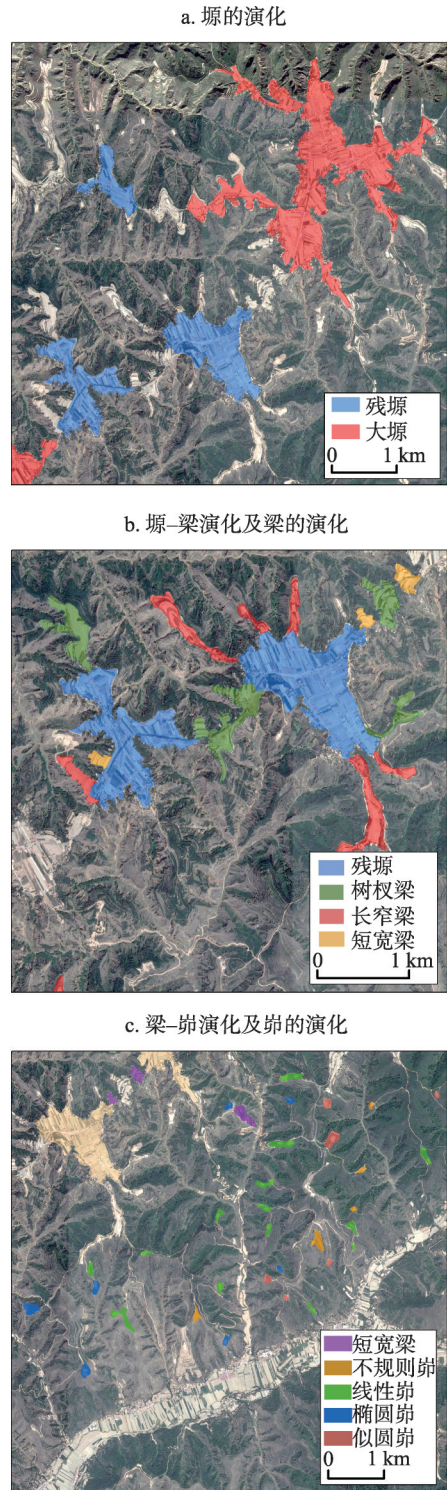


图 5 黄土地貌单元演化发生位置图

Fig. 5 The location of the evolution of loess geomorphological units

割。鄂尔多斯盆地东南部中生代地层中发育有6组节理(E-W、N-S、ENE-WSW、NNW-SSE、WNW-ESE、NNE-SSW),并且构成三期的正交节理系统(E-W与N-S、ENE-WSW与NNW-SSE、WNW-ES与NNE-SSW)^[36-39]。基于Arcgis 10.3软件的流域分析功能提取合水县地区沟谷发育的走向(图10),发现合水县沟谷的走向也有着三组优势方向(E-W与N-S、ENE-WSW与NNW-SSE、WNW-ES与NNE-SSW),这与前人的研究吻合。但考虑到,黄土是第四纪才开始堆积,中生代地层中的节理对第四纪的影响无从而知。本文认为这3组节理对合水县地区较大的沟谷水系有间接影响,可能体现在基底断层和古地形上,而对黄土内部较小的沟谷影响甚微。黄土内部较小的沟谷可能受不同因素的影响,比如:暴雨、干湿度等。较大的沟谷,构造影响大于气候影响;较小的沟谷,气候影响大于构造影响。

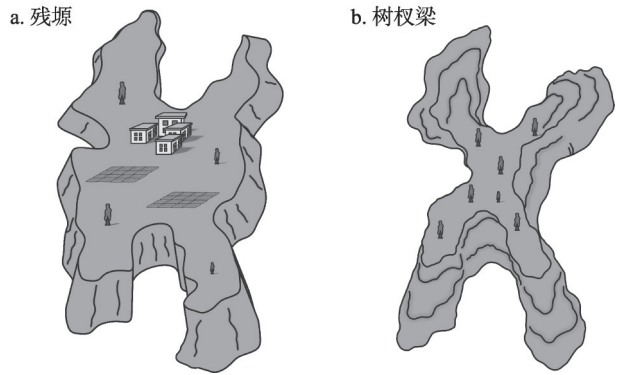


图6 塬向梁演化模式图

Fig. 6 Evolution model of Plateau-to-Beam

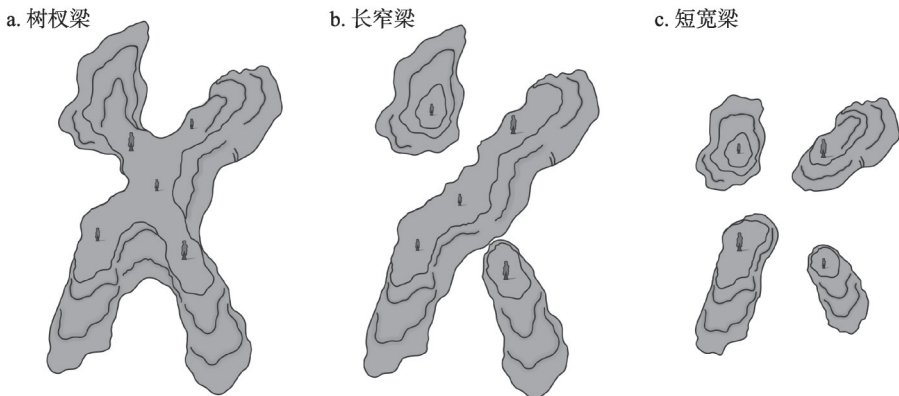


图7 梁的演化模式图

Fig. 7 Evolution model of beam

本文还研究了黄土地貌单元演化对人类生产生活的影 响。结合合水县居民区及道路与塬的分布关系(图11),发现居民区全部位于塬面上,且合水县区域塬的面积为65.76 km²,居民区的面积为22.46 km²,居民区占塬面面积的34.15%;合水县区域内道路总长880.00 km,塬上道路总长314.48 km,塬上道路占总道路的35.74%,且其他道路大都是从塬面上通往沟底的,少有沟内的道路。由此可见,人类的生存生活是十分依赖塬的存在,但侵蚀作用使水土流失,塬面面积减少,人类应该采取措施保

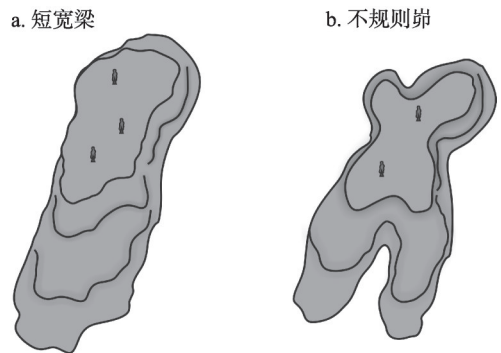


图8 梁向塬演化模式图

Fig. 8 Evolution model of beam-to-loess hills

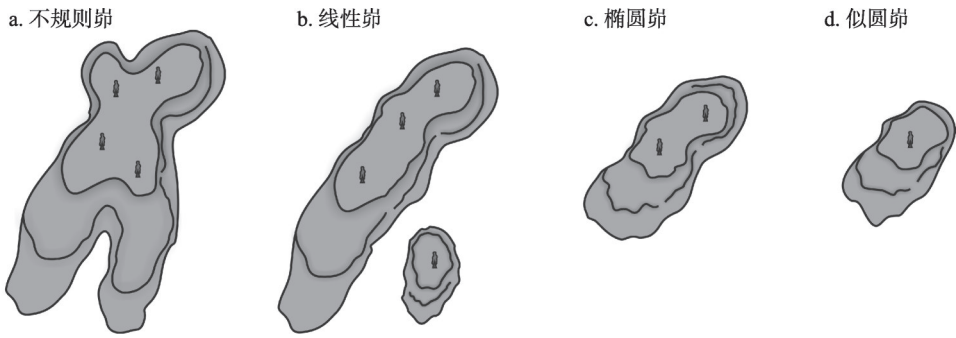


图9 峁的演化模式图

Fig. 9 Evolution model diagram of loess hills

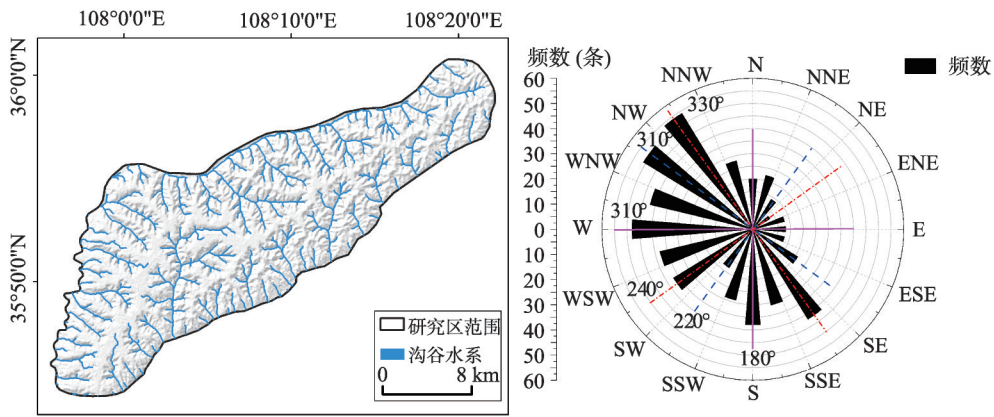


图10 合水县沟谷水系走向玫瑰花图

Fig. 10 Rose map of gully drainage system trend in Heshui county

护赖以生存的家园。首先，人们应该知道，塬是如何被侵蚀消失的。人类居住在塬面上，据4.2章节塬-梁演化的分析，残塬是向树杈梁演化的，而根据影像解译获得的信息表明，梁上是没有居民区的。有人居住的残塬向无人居住的树杈梁演化，从宏观尺度上可视为对人不利土地损失。故本文认为，塬梁演化时的残塬就应是塬逐渐消失的区域，而残塬的分布可见于图3b。故合水县“固沟保塬”工程实施的重点就应该是这些残塬。

5.2 结论

本文通过遥感影像解译合水县区域的塬梁峁地貌并基于数学形态法将其划分为9个黄土地貌单元，提出分

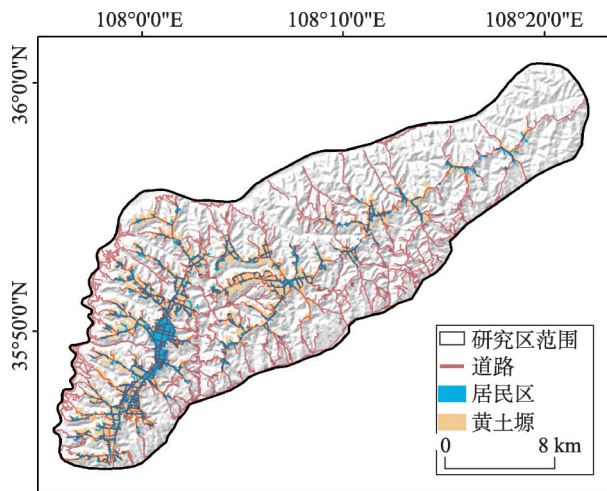


图11 合水县居民区、道路和塬分布情况

Fig. 11 Distribution of residential areas, roads and plateau in Heshui county

类指标并检验；再根据黄土地貌单元的形态特征及分类指标，对塬梁峁的演化模式作出定量化及可视化表达；最后，通过分析人地关系及地貌演化的进程，得到合水县固沟保塬工程实施的方向。

(1) 基于数学形态学发现，似圆度是界定黄土地貌单元演化进程的重要指标。在此基础上，可用周长面积比和平均坡度界定塬梁的分界，可用边界临接指数界定梁峁的分界。

(2) 通过似圆度、平均坡度和边界临接指数所反映的黄土地貌单元特征，可以预测黄土地貌单元的演化模式。似圆度所体现出的形状规律程度显示，黄土地貌单元在演化过程中，其形状规律程度逐渐增加；平均坡度的差异可以区分塬梁，边界临接指数的差异可以区分梁峁。

(3) 人类的生存生活是十分依赖塬的存在，合水县居民区全部位于塬面上，且居民区占塬面面积的34.15%，塬上道路占总道路的35.74%。塬向梁演化实质就是残塬向树杈梁演化，残塬是人类赖以生存的地貌单元，合水县的残塬是发生塬梁演化的重点区域，是固沟保塬工程的重点实施对象。

致谢：匿名评审专家对本文地貌相关概念的区分、黄土地貌单元参数的处理、黄土地貌演化模式多样性的补充以及结果分析、结论梳理方面的修改意见，对提高论文质量起到了至关重要的作用。

参考文献(References)

- [1] Xiong L Y, Tang G A, Strobl J, et al. Paleotopographic controls on loess deposition in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(9): 1155-1168.
- [2] Xiong L Y, Tang G A, Li F Y, et al. Modeling the evolution of loess-covered landforms in the Loess Plateau of China using a DEM of underground bedrock surface. *Geomorphology*, 2014, 209: 18-26.
- [3] 熊礼阳. 基于DEM的黄土地貌继承性研究. 南京: 南京师范大学博士学位论文, 2015. [Xiong Liyang. DEM based Research on the Loess Landform Inheritance in the Loess Plateau Of China. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing Normal University, 2015.]
- [4] 陈传康. 陇东东南部黄土地形类型及其发育规律. *地理学报*, 1956, 23(3): 223-231. [Chen Chuankang. Loess topographic types and their development laws in southeastern of the east of Gansu. *Acta Geographica Sinica*, 1956, 23(3): 223-231.]
- [5] 许炯心. 降水-植被耦合关系及其对黄土高原侵蚀的影响. *地理学报*, 2006, 61(1): 59-67. [Xu Jiongxin. Coupling relationship between precipitation and vegetation and the implications in erosion on the Loess Plateau, China. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 59-67.]
- [6] 陈燕, 齐清文, 杨志平, 等. 数学形态学在黄土地貌单元分类学上的应用. *山地学报*, 2005, 23(1): 96-100. [Chen Yan, Qi Qingwen, Yang Zhiping, et al. Application of math-morphological features in relief taxonomy of Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2005, 23(1): 96-100.]
- [7] 李斌, 张金屯. 黄土高原灌丛景观斑块形状指数和分形分析. *中国农学通报*, 2009, 25(22): 296-300. [Li Bin, Zhang Jintun. The shape indices and scale fractal analysis of shrub landscape in the Loess Plateau. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(22): 296-300.]
- [8] 李斌, 张金屯. 黄土高原草原景观斑块形状指数和分形分析. *草地学报*, 2010, 18(2): 141-147. [Li Bin, Zhang Jintun. Patch shape indices and scale fractal analysis of steppe landscape in the Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(2): 141-147.]
- [9] 刘灿然, 陈灵芝. 北京地区植被景观中斑块形状指数分析. *生态学报*, 1998, 20(4): 559-567. [Liu Chanran, Chen Lingzhi. Analysis of the patch shape with shape indices for the vegetation landscape in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 20(4): 559-567.]
- [10] 谢正峰. 一种测度景观相邻关系的新方法: 边界邻接指数. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(1): 60-63. [Xie Zheng-

- feng. A new method to measure the neighboring relations of landscapes: Boundary Adjacency Index. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(1): 60-63.]
- [11] 龙毅, 周炯, 汤国安, 等. 典型黄土地貌类型区的地形复杂度分形研究. *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. *Mountain Research*, 2007, 25(4): 385-392.]
- [12] 刘双琳, 李发源, 蒋如乔, 等. 黄土地貌类型的坡谱自动识别分析. *地球信息科学学报*, 2015, 17(10): 104-112. [Liu Shuanglin, Li Fayuan, Jiang Ruqiao, et al. A method of loess landform automatic recognition based on slope spectrum. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(10): 104-112.]
- [13] 李喜安, 骆建文, 刘振山, 等. 黄土地貌分类体系研究. *工程地质学报*, 2016, 24(S): 300-306. [Li Xi'an, Luo Jianwen, Liu Zhenshan, et al. Study of classification system of loess landform. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(S): 300-306.]
- [14] 刘振山. 陕北黄土地貌分类及黄土地层特征研究. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2016. [Liu Zhenshan. The study on the classification of loess landscape and the characteristics of loess stratum. Xi'an: Master Dissertation of Chang'an University, 2016.]
- [15] 陈绍宇, 许建民, 王文龙, 等. 黄土高塬沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀特征及其防治途径. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 37-41. [Chen Shaoyu, Xu Jianmin, Wang Wenlong, et al. Erosion features of head-cut and its control measures on dongzhiyuan of the Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4): 37-41.]
- [16] 陈绍宇. 高塬沟壑区溯源侵蚀发生发育规律研究. 陕西: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2009. [Chen Shaoyu. Study of the development law of head-cut erosion on Loess Plateau-taking Dongzhiyuan as an example. Shaanxi: Master Dissertation of Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2009.]
- [17] 黄秉维. 陕甘黄土区域土壤侵蚀的因素和方式. *地理学报*, 1953, 20(2): 63-75. [Huang Bingwei. Factors and ways of soil erosion in Shaanxi-Gansu Loess Region. *Acta Geographica Sinica*, 1953, 20(2): 63-75.]
- [18] 邓成龙, 袁宝印. 末次间冰期以来黄河中游黄土高原沟谷侵蚀-堆积过程初探. *地理学报*, 2001, 56(1): 92-98. [Deng Chenglong, Yuan Baoyin. Processes of gully erosion and accumulation in the Central Loess Plateau of China since the Last Interglacial. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 92-98.]
- [19] 马新中, 陆中臣, 金德生. 流域地貌系统的侵蚀演化与耗散结构. *地理学报*, 1993, 60(4): 367-376. [Ma Xinzhong, Lu Zhongchen, Jin Desheng. Evolution and dissipative structure in the drainage-geomorphic system. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 60(4): 367-376.]
- [20] 张丽萍, 张锐波. 昕水河流域黄土地貌演化与土壤侵蚀关系研究. *山西师范大学学报: 自然科学版*, 1992, 6(2): 59-63. [Zhang Liping, Zhang Ruibo. The research of the relationship between the development of loess landforms and soil erosion in the Xinsui River Basin. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 1992, 6(2): 59-63.]
- [21] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型. *地理学报*, 1996, 63(2): 108-117. [Cai Qiangguo, Shiu-hung Luk, Wang Guiping. Process-based soil erosion and sediment yield model in a small basin in the hilly loess region. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 63(2): 108-117.]
- [22] 郑粉莉, 康绍忠. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理. *地理学报*, 1998, 53(5): 422-428. [Zheng Fenli, Kang Shaozhong. Erosion and sediment yield in different zones of loess slopes. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(5): 422-428.]
- [23] 仝迟鸣. 面向对象的黄土塬特征提取及空间分析. 北京: 中国科学院大学硕士学位论文, 2014: 16-23. [Tong Chiming. Automatic extraction based on object-oriented approach and spatial analysis for loess tableland. Beijing: Master Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 16-23.]
- [24] 姚文波. 历史时期董志塬地貌演变过程及其成因. 西安: 陕西师范大学博士学位论文, 2009. [Yao Wenbo. Geomorphological evolution and its causes of Dong Zhiyuan in historical period. Xi'an: Doctoral Dissertation of Shaanxi Normal University, 2009.]
- [25] 黄春长. 黄土高原南部晚更新世黄土古土壤与气候变迁. *地理学报*, 1989, 56(1): 1-10. [Huang Chunchang. Loess-palaeosol and climatic changes on southern Loess Plateau in late Pleistocene. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 56(1): 1-10.]
- [26] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去30年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. *地理研究*, 2016, 35(1): 49-57. [Yin Yunhe, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 49-57.]
- [27] 王宇航, 赵鸣飞, 康慕滨, 等. 黄土高原地区NDVI与气候因子空间尺度依存性及非平稳性研究. *地理研究*, 2016, 35(3): 493-503. [Wang Yuhang, Zhao Mingfei, Kang Mubi, et al. Spatial scale-dependent and non-stationarity relationships between NDVI and climatic factors in the Loess Plateau. *Geographical Research*, 2016, 35(3): 493-503.]

- [28] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异. 地理学报, 2004, 57(5): 587-594. [Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Variability of the soil physical properties on the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 57(5): 587-594.]
- [29] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响. 地理学报, 2000, 55(1): 84-91. [Wang Jun, Fu Bojie. The impact of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture on the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 84-91.]
- [30] 李茂娟, 李天奇, 朱连奇, 等. 50年来东北黑土区土地利用变化对沟蚀的影响: 以克东地区为例. 地理研究, 2019, 38(12): 2913-2926. [Li Maojuan, Li Tianqi, Zhu Lianqi, et al. Effect of land use change on gully erosion in black soil region of Northeast China in the past 50 years: A case study in Kedong county. *Geographical Research*, 2019, 38(12): 2913-2926.]
- [31] 徐小任, 徐勇. 黄土高原地区人类活动强度时空变化分析. 地理研究, 2017, 36(4): 661-672. [Xu Xiaoren, Xu Yong. Analysis of spatial-temporal variation of human activity intensity in Loess Plateau region. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 661-672.]
- [32] 马乃喜. 黄土地貌演化与土壤侵蚀关系的分析. 水土保持通报, 1996, 16(2): 6-10. [Ma Naixi. Relationship between loess geomorphic evolution and soil erosion. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(2): 6-10.]
- [33] 郭力宇. 陕北黄土地貌南北纵向分异与基底古样式及水土流失构造因子研究. 西安: 陕西师范大学博士学位论文, 2002: 24-28. [Guo Liyu. The relationship between the loess landform and its bedrock type and the impact of the structure on erosion in Shaanbei. Xi'an: Doctoral Dissertation of Shaanxi Normal University, 2002: 24-28.]
- [34] 姜琳, 王清晨, 王香增, 等. 鄂尔多斯盆地东南部中生界地层节理发育特征与古应力场. 岩石学报, 2013, 29(5): 1774-1790. [Jiang Lin, Wang Qingchen, Wang Xiangzeng, et al. Joint development and paleostress field in Mesozoic strata of the southeastern Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(5): 1774-1790.]
- [35] 贺敬聪, 朱筱敏, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区二叠系山西组-石盒子组母岩类型和构造背景. 古地理学报, 2017, 19(2): 285-298. [He Jingcong, Zhu Xiaomin, Li Mingrui, et al. Parent rock types and tectonic setting of the Permian Shanxi and Shihezi Formations in Longdong area, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(2): 285-298.]
- [36] 张岳桥, 廖昌珍, 施炜, 等. 论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形. 地学前缘, 2007, 14(2): 182-196. [Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, et al. On the Jurassic deformation in and around the Ordos Basin, North China. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(2): 182-196.]
- [37] 张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识. 地质学报, 2007, 81(11): 16-34. [Zhang Yueqiao, Donwen, Zhao Yue, et al. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 16-34.]
- [38] 张岳桥, 廖昌珍. 晚中生代-新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造. 中国地质, 2015, 33(1): 28-40. [Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos Basin. *Geology in China*, 2015, 33(1): 28-40.]
- [39] 张岳桥, 施炜, 廖昌珍, 等. 鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换. 地质学报, 2006, 80(5): 639-647. [Zhang Yueqiao, Shi Wei, Liao Changzhen, et al. Fault kinematic analysis and change in Late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos Basin, North China. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 639-647.]

Geomorphological classification and evolution of plateau-beam-loess hills in Heshui county of the east Gansu province

YUAN Shuang, XU Qiang, ZHAO Kuanyao, WANG Xuan, WANG Cuilin

(State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Loess landforms refer to the complex, diverse and orderly differentiated landform morphological combinations that are formed with unique evolution patterns. Based on analysis of mathematical morphology, this study classifies the loess landforms in Heshui county into loess plateaus, beams and loess hills, and develops corresponding classification indexes for them. Furthermore, according to morphological characteristics and classification indexes of loess morphological units, this study establishes quantitative and visual expression landform evolution models for loess plateaus, beams and loess hills, and predicts the parts of loess plateaus that are going to disappear. Roundness is found to be an important indicator to define the evolution process of the loess landform unit, and it increases as the loess landform evolution proceeds. The boundary between loess plateaus and beams can be identified by the perimeter area ratio and the average slope, while that between loess beams and loess hills can be determined by the boundary adjacency index. The transition from a loess plateau to a loess ridge actually corresponds to the evolution from a residual plateau to a branched loess ridge. It is critical to strengthen grooves and protect loess plateaus, since human beings have to rely and live on these residual loess plateaus.

Keywords: east Gansu province; mathematical morphology method; classification index of loess geomorphic unit; evolution of loess geomorphology