

苏博宇,张坪,李豪,等.基于无人机倾斜摄影测量的大同土林地貌形态特征及发育模式研究[J].中国沙漠,2026,46(4):228-237.

基于无人机倾斜摄影测量的大同土林地貌 形态特征及发育模式研究

苏博宇^a,张坪^a,李豪^{bc},梁晓磊^{bc},李继彦^{ac}

(太原师范学院 a.地理科学学院, b.经济与管理学院, c.汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室, 山西 晋中 030619)

摘要: 土林是一种独特的流水侵蚀地貌,由于其分布区域有限,对其发育模式研究仍有待加强。本研究采用无人机倾斜摄影测量技术,对大同盆地土林地貌单体进行形态分类,并结合水文分析方法,探讨了沟谷形态参数随沟谷等级的变化规律,进而提出了土林地貌的发育模式。结果表明:(1)研究区土林单体形态可分为柱状、塔状、锥状、墙状、残柱、残丘等六类。(2)沟谷的长度、宽度与深度随等级升高显著增大,而纵比降则呈递减趋势。自沟头至沟口,沟谷横剖面呈现由浅“V”形向宽“U”形转变的趋势,而纵剖面则表现为加深和溯源伸长的趋势。(3)大同盆地土林地貌的发育模式划分为幼年期、青年期、壮年期与老年期4个阶段。目前,大同土林整体仍处于壮年期发育阶段,景观最为壮观。本研究通过对土林形态特征及发育过程的分析,建立了大同土林的发育模型,可为该地区土林地貌的保护与旅游资源开发提供理论依据及技术支持。

关键词: 大同盆地; 土林; 形态特征; 发育模式; 流水侵蚀

文章编号: 1000-694X(2026)04-228-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00072

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

土林地貌是由半固结或松散的河湖相沉积物经流水侵蚀形成的独特景观,常见于干旱半干旱地区^[1]。土林地貌在物质组成、形态特征及成因机制上呈现出显著的多样性。哥伦比亚Badlands^[2]、玻利维亚“月亮谷”^[3]及土耳其卡帕多西亚^[4]等地的土林多由黏土、凝灰岩等细粒物质构成,受流水作用主导,并常在干旱半干旱气候背景下发育,形成以沟壑状与林柱状为主的形态,高度普遍在几米至几十米。美国布莱斯峡谷^[5]则以砂岩为主,受流水、风蚀与冰蚀复合作用,在干燥寒冷气候下形成规模更大、可达上百米的林柱状地貌,体现了较强的抗蚀性与形态多样性。加拿大阿尔伯特塔^[6]的土林则发育于滨海湿润环境,以半固结砂岩为基础,受流水与冰蚀共同塑造。

国内土林主要分布于云南、西藏、青海以及山

西、甘肃等地。土林地貌组成物质多以湖相、河湖相沉积的半固结黏土、粉砂及砂砾层为主,结构上普遍具有粗细颗粒相间的特点。就土林地貌成因而言,流水作用是最主要的外营力,部分区域如西藏阿里札达^[7]还受到冰蚀影响。土林地貌发育的气候条件以干湿季节分明、降雨集中为共同特征。中国的土林地貌形态以林柱状和沟壑状为典型特征,林柱的整体高度多在几米至几十米,仅个别区域如札达土林可达上百米^[8-9]。

对土林地貌的研究肇始于20世纪60年代,钱方等^[10]最早提出“土林”地貌的概念并将其归类为流水地貌。而谢洪忠等^[11]与陈安泽^[12]分别从旅游角度以及地质学视角,将土林地貌纳入林柱状地貌和碎屑岩(砂砾岩)景观。当前研究主要集中于西藏札达土林与云南元谋土林,围绕其地貌特征^[13]、形成条件^[14]及演化过程^[15]展开系统探讨,揭示了土林发育受构造抬升、气候干湿变化、岩性组成及外

收稿日期:2026-01-13; 改回日期:2026-05-07

资助项目:山西省基础研究计划项目(202103021224304,202303021212257)

作者简介:苏博宇(1999—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为资源开发与评价。E-mail: supery9985@163.com

通信作者:李继彦(E-mail: jyli@tynu.edu.cn)

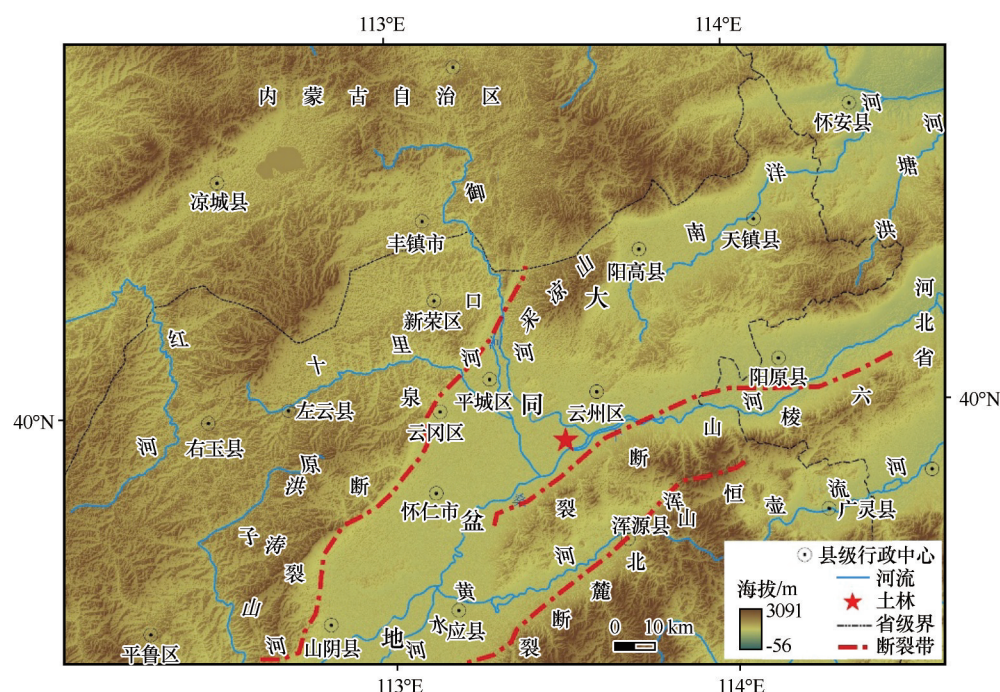
营力耦合共同控制土林发育的基本规律^[16-18],并初步建立了元谋土林的演化模式^[14]。相比之下,大同土林作为华北地区唯一的土林景观,以往研究多集中于沉积物粒度特征^[8]与古气候重建^[19],已明确其物质组成以粉沙和黏土为主^[20],形成于河湖相与风成沉积的互层环境,且发育过程与晚更新世以来气候冷暖旋回密切相关。此外,部分学者还针对大同土林景区的旅游资源开发与保护开展了深入探讨^[21-22]。然而,关于大同土林地貌的发育模式尚未有系统阐述。为此,本研究基于野外实地考察并结合无人机倾斜摄影测量技术,获取高分辨率数字高程模型(Digital Elevation Model,简称DEM)数据,系统探究了大同土林的形态特征及发育模式。本研究不仅能为土林地貌发育理论提供典型实证与定量参数,深化对侵蚀循环与地貌演化的认识,也可为景区可持续发展提供关键科学支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

大同盆地为典型的山间断陷盆地,受口泉断裂、六棱山断裂以及恒山北麓断裂等控制,呈北东-南西向延伸,长约200 km,宽20~40 km,总面积约

6 000 km²^[23](图1)。由盆地边缘向中心依次发育洪积台地、洪积倾斜平原、湖积冲积平原、河谷冲积平原,局部洼地存在盐碱化现象^[24]。盆地属温带大陆性半干旱气候,年平均气温7℃,年降水量约400 mm,降水集中于夏季,年平均风速2.5~3.5 m·s⁻¹^[25]。大同土林位于大同盆地南部边缘六棱山山前,向南、向东分别距桑干河、坊城河约6 km,向西距御河约7 km,处于三条河流形成的冲积平原之上。土林核心区域位于大同市云州区杜庄乡附近,约40°02'N、113°18'E,沿沟谷呈带状分布,集中分布面积约2 km²。土林出露地层由第四纪中晚更新世河湖相粉砂、黏土组成,自上而下可分为四层,最上层为浅灰黄色粉砂质沉积物,结构极为疏松;第二层主要由棕褐色至棕红色极细砂质粉砂组成,质地较紧实,可见少量植物根系;第三层为灰绿色至黄绿色粉砂质细砂,质地较硬,发育薄层水平层理;第四层呈棕红色,以细砂质粉砂为主,含铁锈色斑状浸染与植物根管,表现为细砂、极细砂与黏土质粉砂互层的薄层构造^[26]。该区发育的典型土林地貌^[27],包括密集的沟谷系统、孤立的土柱与土墙,完整记录了沉积物在构造抬升背景下,经流水侵蚀、块体运动、风化作用等多种外营力共同作用的过程。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

图1 大同盆地及土林地理位置

Fig.1 Geographical location of the Datong Basin and the earth forest

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

数据获取使用大疆精灵 4RTK 型无人机平台, 自带传感器, 搭载 X4S 云台相机。无人机飞行高度为 180 m, 地面分辨率为 5 cm, 航向重叠率与旁向重叠率分别设置为 80% 和 70%。影像后期处理基于大疆制图软件进行, 主要流程包括图像预处理、空中三角测量及正射镶嵌, 最终生成数字正射影像 (Digital Orthophoto Map, 简称 DOM) 与数字表面模型 (Digital Surface Model, 简称 DSM)。为进一步提取地形信息, 通过点云滤波技术消除植被覆盖影响, 得到空间分辨率为 1 m 的 DEM。采用 CGCS2000 坐标系, 高斯-克吕格 (3 度带) 投影。对于土林地貌的形态分类主要基于野外实地考察以及 OSGBLab 软件测量, 对于沟谷的提取和形态参数测量主要基于 ArcGIS 的水文分析方法和相关测量工具。

1.2.2 土林形态参数测量方法

基于已有的高精度三维模型, 在 OSGBLab 软件的三维浏览器中, 可通过点选直接获取任意位置高程, 顶面与底面二者中心点处的高程差值即为土林单体高度。面积测量可在模型表面划定多边形, 同时获取其在水平面的实际起伏地表面积。体积计算则通过设定一个参考基准面, 软件通过分析模型表面与基准面之间的空间差异, 自动精确输出挖方量、填方量, 二者差值则为土林单体的体积。

1.2.3 水文分析法

该方法是在上述生成的 DEM 基础上, 用以提取土林区域的线状沟谷并分级。

(1) 洼地填充处理。使用 ArcGIS 的 Spatial Analyst 工具对原始 DEM 进行填洼处理, 消除地形凹陷和异常, 生成无洼地的“数据填洼”栅格。

(2) 水流方向确定。基于填洼后的 DEM, 采用 D8 单流向算法计算每个像元的水流方向, 生成“流向数据”栅格, 作为后续分析的基础。

(3) 汇流累积量计算。利用水文分析模块的“流量累计”功能计算每个像元的上游汇水区累积流量, 生成“流量数据”栅格。

(4) 河网等级划分。使用栅格计算器, 对流量栅格设定一个阈值, 即“流量”>500。满足条件的像元即为河网, 采用 Strahler 分级法, 通过 Stream Order 工具对河网进行等级划分, 即无支流为 1 级、同

级河流交汇则升级, 不同等级两条河流交汇形成的河流, 等级为原来河流中的较高等级。进而生成“河网分级数据”, 清晰显示主流与支流。

(5) 河网矢量转化。将栅格河网转为矢量格式, 结合流向数据生成“河流数据”图层, 并通过分级符号可视化不同等级河段, 直观呈现河网空间结构。

1.2.4 沟谷长、宽、深以及剖面图的提取方法

沟谷长度提取: 基于已获取的沟谷矢量数据, 利用计算字段功能, 依据沟谷中心线各节点坐标, 逐段累加相邻节点间的距离, 从而求得沟谷总长度。

沟谷深度计算: 沟谷下切深度是反映垂向侵蚀程度的关键指标。在 ArcGIS 中, 借助 3D Analyst 工具的“Interpolate Shape”功能, 沿沟谷中心线提取高程数据, 生成纵剖面线。进一步通过计算字段工具, 统计剖面线上高程最大值与最小值之差, 作为该沟谷的下切深度。

沟谷宽度测量: 沟谷宽度用于表征横向扩展规模。基于 DEM 数据, 在 ArcGIS 中沿沟谷自沟头至沟口等间距布设三条垂直于沟谷走向的横断面, 利用 Profile Graph 功能获取各横断面高程剖面。以各横断面两侧最大水平距离作为该处沟宽, 最终取三处沟宽的平均值作为该沟谷的宽度。

沟谷剖面图的提取: 在 ArcGIS 中, 使用 3D Analyst 工具沿沟谷中心线提取纵剖面, 自沟头至沟口等间距插入三条垂直于沟谷走向的线并生成横剖面图。

1.2.5 沟谷纵比降

沟谷纵比降是流域内主沟道高程差与主沟道长度的比值, 能够反映沟谷整体侵蚀势能, 是描述沟谷在垂直方向上侵蚀发育程度的重要指标。指标值越小, 说明沟谷的下切侵蚀能量越低或不再占据主导, 沟谷越趋近于稳定的宽谷, 发育程度越高。

$$J = \frac{H_s - H_0}{l} \quad (1)$$

式中: J 为主沟道纵比降; H_s 为主沟道沟头处的高程; H_0 为主沟道沟口位置的高程; l 为主沟道长度。

2 结果与分析

2.1 林柱地貌形态学分类

土林地貌可分为剥蚀地貌和堆积地貌, 其中剥

蚀地貌主要为流水剥蚀,根据形态特征进一步划分为沟谷地貌、林柱地貌和潜蚀地貌^[1]。由于堆积地貌和潜蚀地貌个体规模较小,在生成的 DEM 上难以识别,因此本文重点探讨林柱地貌及沟谷地貌。通过野外实地考察,并结合形态参数特征(表 1),可将林柱地貌划分为以下几种类型(图 2)。

表 1 土林形态参数
Table 1 Morphological parameters of various types of earth forest

类型	高/m	顶面面积/m ²	底面面积/m ²	顶面、底面面积比	体积/m ³
柱状	4.24~6.53	3.45~10.51	3.93~12.56	0.74~0.89	15.80~68.68
塔状	4.95~6.33	0.56~2.63	3.63~9.87	0.15~0.27	10.63~26.52
锥状	3.67~4.69	0.23~0.56	3.20~6.24	0.06~0.09	3.73~18.89
墙状	4.50~7.36	47.21~220.39	52.21~245.89	0.82~0.93	229.03~1 796.40
残柱	1.90~3.24	0.56~1.89	2.12~3.69	0.29~0.54	3.49~9.48
残丘	1.12~1.73	/	2.56~3.79	/	2.24~3.43

(1) 柱状土柱:柱状土林的高度 4.24~6.53 m,顶面、底面面积分别为 3.45~10.51 m²与 3.93~12.56 m²,两者之比为 0.74~0.89,体积 15.80~68.68 m³,在土林地貌中属中等规模。主要分布于三级沟谷两侧,对应壮年期发育阶段。同时二级沟谷中也有少量分布,表明青年期也可形成小型柱状体。几何形态呈现圆柱形或多棱柱形,既有独立单体也存在集群式分布形态(图 2A)。

(2) 塔状土柱:塔状土林的高度为 4.95~6.33 m,顶面面积(0.56~2.63 m²)显著小于底面面积(3.63~9.87 m²),顶面、底面面积之比远小于柱状土林,接

近 0.1。体积 10.63~26.52 m³,小于柱状类型,表现出顶部物质保存少、下部较宽的形态特征。常与柱状土林同时出现在三级沟谷处。形态特征直接反映了沉积地层的岩性交替,多层结构造就独特的阶梯状外观(图 2B)。

(3) 锥状土柱:高度较低,为 3.67~4.69 m,顶面面积积极小(0.23~0.56 m²),底面面积稍大(3.20~6.24 m²),二者比值介于 0.06~0.09,体积在 3.73~18.89 m³,属于典型的中小型尖顶土林。该类土林保存时间相对较短,大多相连形成组合型土林,少见单独个体(图 2C)。



图 2 大同土林形态分类
Fig. 2 Morphological classification of the Datong earth forest

(4) 墙状土林:该类土林在规模上最为突出,高度为 4.50~7.36 m,顶面、底面面积分别高达 47.21~220.39 m²和 52.21~245.89 m²,二者比值接近于 1,体积介于 229.03~1 796.40 m³,是大型的墙状或者长垣状地貌体。墙状土林多分布于二级沟谷中,反映其与青年期强烈的溯源侵蚀和下切作用密切相关。随着侵蚀继续,墙状土林会被切割,进而演化为柱状或塔状土柱(图 2D)。

(5) 残柱:高度多低于 3 m,体积较小,约 3.49~9.48 m³,顶面面积小且不规则。主要为柱状或塔状土林因侵蚀加剧、顶部保护层丧失而进入衰亡阶段的不稳定残余体(图 2E)。

(6) 残丘:高度、体积都很小,分别为 1.12~1.73 m、2.24~3.43 m³,外观呈低矮、浑圆状的土丘,指示土林地貌进入消亡阶段(图 2F)。研究区内残柱、残丘的空间分布与四级沟谷高度吻合,指示了区域性地貌的衰退趋势。

2.2 沟谷形态参数特征

依据水文分析方法,在大同土林发育核心区共提取 200 条沟谷,并测量形态参数(图 3)。基于 Strahler 分级法^[28],沟谷共分为 4 个等级,一至四级沟谷的数目分别为 97、61、27、15 条,分别占总测量沟谷的 48.5%、30.5%、13.5%、7.5%。

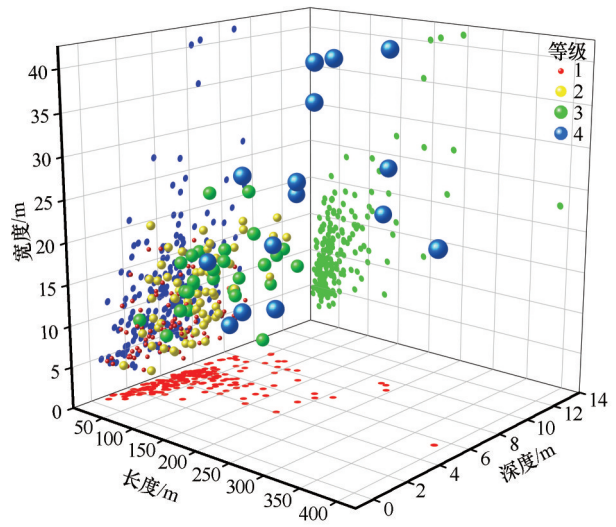


图 3 沟谷形态参数 3D 散点图
Fig. 3 3D scatter plot of gully morphological parameters

一级沟谷的长度、深度、宽度分别为 4.53~78.91、0.62~5.89、2.29~8.62 m,平均值依次为 25.92、4.05、5.91 m。二级沟谷的形态参数明显增大,长度、深度、宽度的平均值分别增长至 44.08、4.76、8.08 m。

三级沟谷进一步发展,长度、深度、宽度的平均值升至 71.97、5.23、13.67 m。四级沟谷的规模最大,长度、深度、宽度分别为 76.91~387.95、3.94~9.47、7.64~41.30 m,平均值分别为 182.61、6.32、24.64 m。因此,沟谷的长度、深度、宽度等形态参数表现出随着沟谷等级的升高而显著增加的趋势(表 2),与黄土地貌沟谷形态参数变化规律相似^[29-30]。黄土区沟谷形态参数的变化规律主要受其土壤理化性质和外营力长期作用的共同影响^[31]。

表 2 不同等级沟谷形态参数特征
Table 2 Summary of parameters for gullies of different classes

沟谷等级	形态参数	最大值	最小值	平均值
1	长度/m	78.91	4.53	25.92
	深度/m	5.89	0.62	4.05
	宽度/m	8.62	2.29	5.91
	纵比降/%	32.36	10.30	18.36
2	长度/m	105.20	11.00	44.08
	深度/m	7.09	1.25	4.76
	宽度/m	15.69	2.72	8.08
	纵比降/%	24.94	8.13	13.05
3	长度/m	144.70	15.55	71.97
	深度/m	9.19	2.35	5.23
	宽度/m	24.08	6.24	13.67
	纵比降/%	18.11	3.37	9.03
4	长度/m	387.95	76.91	182.61
	深度/m	9.47	3.94	6.32
	宽度/m	41.30	7.64	24.64
	纵比降/%	7.15	1.41	3.86

同时,一至四级沟谷纵比降的平均值依次为 18.36%、13.05%、9.03%、3.86%,表明沟谷纵比降与沟谷等级呈明显的负相关关系(表 2)。一级沟谷的纵比降最大,平均值为 18.36%,指示在沟谷的源头地区地表径流能量集中,易发生强烈的下蚀及溯源侵蚀^[32]。随着沟谷等级升高、坡度减缓,导致成熟期沟谷纵比降降低,沟谷下切活动减缓,侧向侵蚀作用相对增强,导致沟谷逐渐展宽,土柱之间的间距相应增大甚至有可能被完全侵蚀,地形趋于平缓^[33-34]。此外,沟谷加深的幅度远小于其伸长的幅度,表明在沟谷发育初期,沟谷的溯源侵蚀速率,远超过下切侵蚀速率。

2.3 沟谷地形剖面特征

沟谷地形剖面包括纵剖面 and 横剖面(图4)。纵剖面是指沿沟谷水流方向(自沟头至沟口)所做的剖面,横剖面指垂直于沟谷延伸方向的断面形态。通过分析沟谷剖面的形态特征,可揭示区域地貌发育阶段。图4中A、B、C、D分别展示4个等级沟谷典型剖面组合。

自沟头至沟口,沟谷横剖面形态呈现明显的加深与展宽过程。上游沟头区以下切侵蚀为主导,形成宽浅的“V”形谷;中游段过渡为拓宽加深的“V”形谷或不对称谷;至下游及沟口区,侧蚀与堆积作用

共同主导,发育为宽阔的“U”形谷。这一横剖面变化过程清晰地反映了流水侵蚀作用从以下蚀为主逐渐转变为侧蚀与堆积作用主导的动态过程^[35-37]。同时,随沟谷等级的递增,沟口宽度有明显增大的趋势,表明沟谷侧蚀能力具有随沟谷等级升高而增强的趋势^[38]。此外,沟谷的下切侵蚀过程主要受控于土林地区的侵蚀基准面,并随着接近该基准面而逐渐停滞。低等级沟谷因距侵蚀基准面较高,可获得较大的潜在下切空间,下切速率较快。随着等级升高,沟谷逐渐接近地方侵蚀基准面,导致下切速率减缓并最终趋于停滞^[39]。

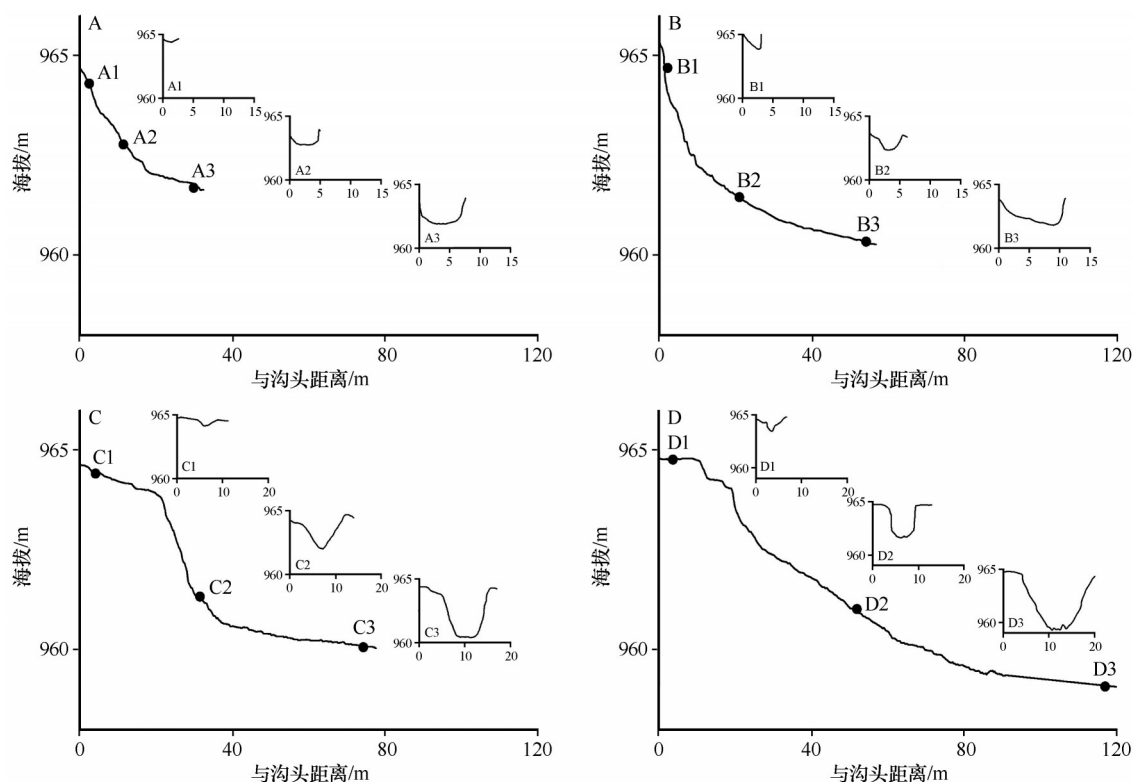


图4 沟谷剖面示意图

Fig.4 Schematic diagram of gully profiles

沟谷纵剖面呈现不断伸长的趋势。一级沟谷纵剖面整体长度较小,但坡度较大(图4A)。二级沟谷纵剖面呈显著下凹形态,表明沟谷在积极地下切侵蚀^[40],且向源头方向伸长(图4B)。三级沟谷进一步加深和溯源伸长,受岩性差异影响,纵剖面出现阶梯状陡坎,形成裂点(图4C)。该处裂点的形成是由于沟谷下切到第三层后,由于该层富含黏土沉积物,脱水晒干后特别坚硬,当地人称之为“石板”。四级沟谷已接近下切至侵蚀基准面,下切侵蚀速率放缓,纵剖面呈下凹曲线,坡度显著降低(图4D)。

综上所述可知,低等级沟谷纵剖面坡度较陡,反映沟谷发育初期的快速下切侵蚀过程,且沟谷向源伸长速度大于高等级沟谷,常发育裂点^[41]。在流水下蚀与侧蚀作用下,高等级沟谷纵剖面逐渐过渡为下凹曲线,接近均衡剖面形态,指示流水的搬运与侵蚀能力达到动态平衡^[42]。

2.4 土林地貌发育模式

土林的形成是一个多因素耦合的地质演化结果,形成主要受构造运动与流水、重力、风化作用等

内外营力的长期作用^[43-44]。大同盆地为典型的山间断陷盆地^[27],持续接受来自周围山地的陆源碎屑沉积,堆积的新生代泥河湾组地层构成了土林发育的成景地层^[8]。中更新世末期,随着区域性构造抬升和大同盆地气候变干,昔日的泥河湾古湖逐渐萎缩消失,原本在水下的沉积地层出露于地表,为外力侵蚀创造了物质条件^[19]。其后,地表径流沿着先前的地层层面、节理、裂隙等软弱带进行持续不断的冲刷、下切和侧蚀^[45],并将地面切割成密集的、纵横交错的冲沟网^[46]。随着沟谷的不断加深、加宽和溯源侵蚀,沟间地逐渐被分割、缩小,最终演变为孤立的、形态各异的土柱、土墙、土锥等。

基于地貌侵蚀循环学说,并类比典型流水和风力侵蚀地貌发育模式^[47-49],大同土林的演化可划分为幼年期、青年期、壮年期和老年期4个阶段(图5)。幼年期,以密集的细节、切沟系统为主,沟谷初步发育,土林地形尚未显著形成,地表平坦区仍占主导,整体处于侵蚀初始阶段(图5A)。该阶段多为处于发育初期的一级沟谷,长度、深度、宽度平均值分别

为25.92、4.05、5.91m,三者均较小。青年期,沟谷快速加深、延长,沟谷系统拓展,形成连续土墙、土台等雏形土林,且土林高度逐渐增大,多分布于沟谷上游或沟头区域(图5B)。此阶段多发育二级沟谷,长度、宽度与深度较一级沟谷显著增加,形成雏形土林。壮年期,随着沟谷进一步展宽,流水侧蚀与重力崩塌塑造了柱状、塔状等典型土林,该阶段正负地形组合最为复杂(图5C)。这一阶段沟谷长度、宽度进一步增大,深度虽有增加但增速减缓,流水下切侵蚀接近基准面。老年期,负地形持续拓宽,正地形因持续剥蚀与崩塌逐渐低矮、稀疏,最终演化为残丘,地形趋于平缓(图5D)。元谋土林的堆积-侵蚀-夷平三分法^[14],强调从物质基础到形态塑造再到最终夷平的完整过程,时间尺度宏大,与区域构造运动联系紧密。本研究聚焦于流水等外营力在大同土林地貌发育中的作用,强调对土林不同发育演化阶段地表形态特征的刻画,时间尺度相对较短。总体来看,前者强调整体地质过程,而本文更加侧重土林形态发育细节,尤其是流水侵蚀在不

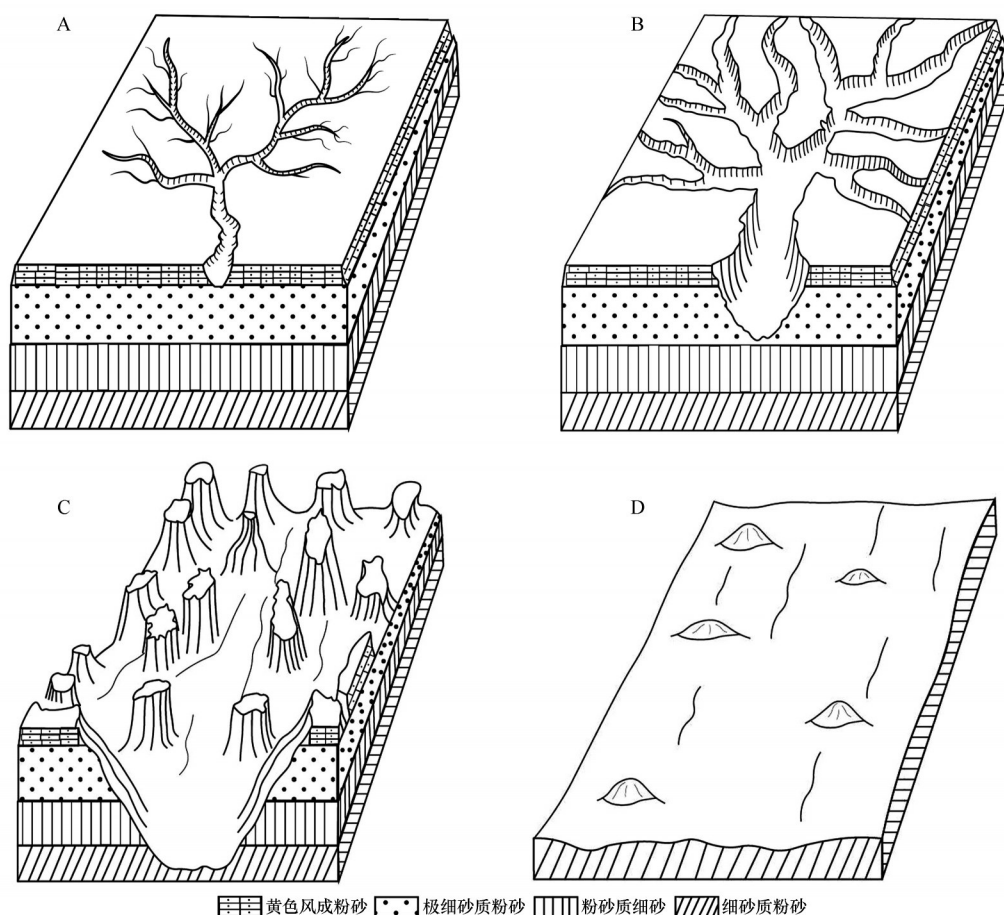


图5 大同土林发育演化模型图

Fig.5 Model diagram of the evolution pattern of Datong earth forest

同阶段的作用方式及其在沟谷形态参数上的具体体现。

综合对林柱与沟谷形态的定量分析,本研究认为大同土林目前处于壮年期发育阶段。这是由于区内塔状及密集分布的柱状土林在空间上占据主导地位,且伴生的沟谷系统横剖面多呈开阔的“U”形,地貌系统正处于侵蚀强度大、形态类型最为丰富的演化鼎盛阶段。而在沟头部位,墙状、柱状土林与陡峭的“V”形谷相伴,在主沟谷侧缘,墙状体还未被蚀穿形成孤立塔状、柱状土林,指示了幼年期以及青年期的发育进程。而在沟谷下游,广泛分布的浑圆锥状体、残柱及残丘,标志着老年期的衰退阶段。因此,大同土林呈现的是一个以壮年期为主体、多演化阶段并存的复杂地貌系统。其演化并非简单的线性更替,而是在不同微地貌单元内,因侵蚀动力条件和物质稳定性的差异,形成了老年期残丘与幼年期陡壁共存于同一沟谷系统的场景。

3 结论

基于形态特征差异,大同土林单体形态可划分为柱状、塔状、锥状、墙状、残丘及残柱六类。随沟谷等级升高,沟谷长度、宽度与深度显著增大,而纵比降则规律性递减。自沟头至沟口,沟谷横剖面呈现由浅“V”形向宽“U”形转变的趋势,而纵剖面则表现为加深和溯源伸长的趋势,揭示了下蚀加深、侧蚀展宽与溯源伸长的复合侵蚀过程。大同土林演化可划分为幼年期、青年期、壮年期和老年期4个阶段。目前,大同土林整体仍处于壮年期发育阶段,景观最为壮观。从区域系统视角看,大同土林沟头区域持续的溯源侵蚀促进新土林的形成,而下游区域则在外营力作用下不断退化。

参考文献:

- [1] 罗鹏辉,张世涛,田宜敏,等.土林地貌分类研究[J].地球学报,2020,41(4):575-582.
- [2] Nadal-Romero E, Martinez-Murillo J F, Kuhn N J, et al. Badlands Dynamics in a Context of Global Change [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2019.
- [3] 朱能.世界十大地理奇观[J].人才资源开发,2017(3):68.
- [4] Howard A D, Kerby G. Channel changes in badlands [J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, 94(6): 739-752.
- [5] Yilmaz H M, Yakar M, Mutluoglu O, et al. Monitoring of soil erosion in Cappadocia region (Selime-Aksaray-Turkey) [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(1): 75-81.
- [6] 邱开国,伯慧,饶玉彬,等.北美阿尔伯塔盆地的构造演化以及层序地层特征[J].民营科技,2014(11):61.
- [7] 侯利锋,刘建兵.西藏札达土林地貌形成条件及演化过程[J].西部探矿工程,2017,29(2):65-68.
- [8] 蔡莹莹,李继彦,屈欣,等.大同土林地貌沉积物粒度特征分析[J].干旱区研究,2021,38(3):892-900.
- [9] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.黄土丘陵沟壑区吕二沟流域水沙关系变化分析[J].中国水土保持科学,2013,11(5):1-8.
- [10] 钱方,凌小惠.元谋土林成因及类型的初步研究[J].中国科学,1989(4):412-418.
- [11] 谢洪忠,杨世瑜.林柱状地质景观的类型与分布[J].地质与资源,2006(1):78-80.
- [12] 陈安泽.论砂(砾)岩地貌类型划分及其在旅游业中的地位 and 作用[J].国土资源导刊,2004(1):11-16.
- [13] 杨文礼,孙林龙,张卫锋,等.云南元谋土林地貌景观初步研究[J].云南地质,2023,42(2):131-137.
- [14] 刘志明,张世涛.元谋土林地貌特征及其形成演化分析[J].中国水运,2022,22(2):127-128.
- [15] 何彩帆,沙云美,曹睿婕.元谋土林地貌的形成机制[J].炎黄地理,2025(5):176-178.
- [16] 谢洪忠,杨世瑜,王守军.元谋土林地质景观特征及其旅游开发与保护[J].南方国土资源,2005(9):21-23.
- [17] 李寅,刘朝万.西藏札达土林地质史诗[J].资源与人居环境,2018(10):24-35.
- [18] 朱仁鹏,石晨霞.对西藏札达土林国家地质公园旅游业发展的思考[J].安徽农业科学,2011,39(13):7900-7901.
- [19] 张慧.大同土林风景区晚更新世以来气候变化初步研究[D].太原:山西大学,2014.
- [20] 赵艺学.大同土林景区主要自然景物——土林形成发展过程及安全保护[J].干旱区资源与环境,2012,26(7):195-200.
- [21] 周玲,刘敏,柳文龙,等.土林旅游游客满意度评价及提升策略研究:以大同土林旅游为例[J].太原师范学院学报(自然科学版),2019,18(1):70-75.
- [22] 任勇.保护大同土林势在必行[J].文化产业,2020(25):43-46.
- [23] 葛勤,张俊朋,汪洋,等.大同盆地地下水硝酸盐分布特征及来源解析[J].中国环境科学,2025,45(2):1004-1015.
- [24] 郭晓宇,郑吉林,吕凯宁,等.大同盆地土壤盐碱化特征及地质成因研究[J].地质论评,2024,70(S1):29-30.
- [25] 张莉秋,张红,李皎,等.晋北沙漠化地区1980—2014年的气候变化[J].中国沙漠,2016,36(4):1116-1125.
- [26] 柳苗苗,苏志珠,孔梦园,等.220ka BP来大同盆地常量元素记录的气候变化[J].中国沙漠,2018,38(2):278-285.
- [27] 李铁锋,任明达.大同盆地晚新生代环境演化特征[J].北京大学学报(自然科学版),1993,29(4):476-483.
- [28] 刘辉辉,马乐军,李文峰,等.Strahler河流分级方法的算法实现与实证分析[J].金陵科技学院学报,2022,38(4):10-17.
- [29] Castillo C, Pérez R, James R M, et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(4): 1319-1332.
- [30] Eltner A, Baumgart P, Maas H, et al. Multi-temporal UAV data

- for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(6): 741–755.
- [31] 何雨, 贾铁飞, 李容全. 黄土丘陵区沟谷发育及其稳定性评价[J]. *干旱区地理*, 1999, 22(2): 64–70.
- [32] Liang W, Xu X, Zheng F. Step-pool morphology in ephemeral gullies on steep slopes of the Loess Plateau: comparisons with other linear erosion features[J]. *Geomorphology*, 2025, 489: 110007.
- [33] Hu J, He Y, Huang K, et al. Spatio-temporal characteristics of the morphological development of gully erosion on the Chinese Loess Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(15): 2710.
- [34] Deng Q, Qin F, Zhang B, et al. Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: a case of Yuanmou dry-hot valley[J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 703–713.
- [35] 那嘉明, 杨昕, 李敏, 等. 黄土高原切沟地貌学研究述评[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(4): 68–75.
- [36] Li Z, Zhang Y, Zhu Q, et al. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area[J]. *Catena*, 2017, 148: 195–203.
- [37] 李晨瑞, 李发源, 马锦, 等. 黄河中游流域地貌形态特征研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(4): 107–112.
- [38] 周毅, 王泽涛, 杨锋. 基于DEM的黄土沟谷横剖面形态特征研究: 以宜君、延安、绥德为例[J]. *地理科学*, 2020, 40(3): 455–465.
- [39] 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.
- [40] 陆中臣, 周金星, 陈浩. 黄河下游河床纵剖面形态及其地文学意义[J]. *地理研究*, 2003, 22(1): 30–38.
- [41] 王世龙, 李金阳, 刘静, 等. 澜沧江裂点带支流河谷纵剖面和下切量空间分布特征及其演化趋势分析[J]. *地质通报*, 2025, 44(8): 1535–1549.
- [42] 盛贺伟, 孙莉英, 蔡强国. 黄土坡面细沟发育形态对侵蚀特征的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(4): 679–688.
- [43] Liu L, Li F, Yang X, et al. Morphological characteristics and evolution model of slope units along loess gully cross section[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2023, 18(1): 17–29.
- [44] Feng Y, Mu H, Qin F, et al. Modeling the morphology of gully cross sections in the Yuanmou dry-hot valley[J]. *Physical Geography*, 2017, 38(5): 448–469.
- [45] 杨昕, 汤国安, 袁宝印, 等. 黄土高原勺状沟壑特征及发育过程[J]. *地理研究*, 2021, 40(7): 1870–1886.
- [46] Jin Z, Peng J, Zhuang J, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(4): 821–839.
- [47] Schumm S A, Lichty R W. Time, space, and causality in geomorphology[J]. *American Journal of Science*, 1965, 263: 110–119.
- [48] Dong Z, Lv P, Lu J, et al. Geomorphology and origin of yardangs in the Kumtagh Desert, Northwest China[J]. *Geomorphology*, 2012, 139–140: 145–154.
- [49] 彭华, 潘志新, 闫罗彬, 等. 国内外红层与丹霞地貌研究评述[J]. *地理学报*, 2013, 68(9): 1170–1181.

Morphological characteristics and evolution pattern of the Datong earth forest based on UAV oblique photogrammetry

Su Boyu^a, Zhang Ping^a, Li Hao^{bc}, Liang Xiaolei^{bc}, Li Jiyan^{ac}

(a.School of Geographical Sciences /b.School of Economics and Management /c.Shanxi Provincial Key Laboratory of Surface Processes and Resource Ecological Security in Fenhe River Basin, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: The earth forest landform is a unique landscape formed through fluvial erosion of semi-consolidated or unconsolidated fluvial-lacustrine sediments, is primarily distributed in arid and semi-arid regions. The present study focuses on the formation mechanisms and evolutionary processes of the Datong earth forest, aiming to systematically elucidate the intrinsic relationships among its morphological characteristics, evolution stages, and variations in gully parameters. Based on high-resolution imagery data acquired by UAV-based oblique photogrammetry, combined with morphological classification and hydrological analysis, this research investigates the patterns of gully system parameters (length, width, depth, and longitudinal gradient) across different gully orders and their roles in shaping the earth forest landscape. The results indicate that: (1) The earth forest in the study area can be classified into six types, i.e. columnar, tower-like, conical, wall-like, residual pillars, and remnant mounds; (2) The length, width, and depth of gullies increase significantly with gully orders, while the longitudinal gradient shows a systematic decreasing trend. The characteristics of cross-sections and longitudinal profiles suggest a shift in dominant fluvial erosion processes from vertical incision and headward erosion to lateral erosion; (3) Accordingly, a four-stage evolutionary pattern is proposed for Datong earth forest, encompassing juvenile, youthful, mature, and old stages. Each stage is characterized by distinct dominant erosion processes, morphological features, and spatial structures. The Datong earth forest is currently still in its mature stage of evolution, presenting the most spectacular landscapes. Through the analysis of morphological characteristics and evolution processes of the earth forest, this study establishes an evolutionary model for the Datong earth forest, which can provide a theoretical basis and technical support for the conservation and sustainable tourism development of this landform in the region.

Key words: Datong Basin; earth forest; morphological characteristics; development model; fluvial erosion