

# 东北漫川漫岗黑土区典型农业小流域切沟 沟头形态特征及其影响因素

杨帆<sup>1,2</sup>, 巩子瑞<sup>1</sup>, 郭明明<sup>2</sup>,  
张立波<sup>1</sup>, 鲁文龙<sup>1</sup>, 刘欣<sup>2</sup>, 王百阳<sup>3</sup>, 张靖雪<sup>1</sup>

(1.吉林农业大学 资源与环境学院, 吉林 长春 130061; 2.中国科学院  
东北地理与农业生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3.吉林省水利科学研究院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** [目的] 研究中国东北漫川漫岗黑土区典型农业小流域切沟沟头形态特征及其影响因素, 为控制黑土区沟壑侵蚀提供基础数据和理论支撑。[方法] 以黑龙江省海伦市海南乡典型农业小流域切沟沟头为研究对象, 野外实地调查沟头形态特征及土壤类型和土体构型, 解析沟头形态特征与沟头内因(土壤特性)及外部环境因素的相关性, 分析内外因素对沟头形态的影响。[结果] ①海南乡小流域切沟沟头土壤类型为典型黑土、草甸黑土和冲积土, 土体构型以腐殖质层(A)+淀积层(B)+母质层(C)型为主, 以腐殖质层(A)+母质层(C)及腐殖质层(A)+母质层(C)+埋藏层(Ab)型为辅。②相关性分析表明, 沟头形态与内外因素呈现复杂的相关性, 单一形态不仅受内外因素的影响, 同时受自身形态的共同作用影响。③冗余分析表明, 土体构型、汇水面积、沟头坡度是影响沟头形态的主要因子, 且与沟头形态呈正相关关系; 沟头植被覆盖度、作物距沟头距离、沟头垄向与沟头立面夹角与沟头形态呈负相关关系。[结论] 切沟沟头形态特征复杂, 土壤垂向差异性内因是根本, 沟头形态受内外因素共同影响。

**关键词:** 漫川漫岗; 黑土区; 沟头形态; 土体构型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0001-08

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 杨帆, 巩子瑞, 郭明明, 等. 东北漫川漫岗黑土区典型农业小流域切沟沟头形态特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 1-8. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240313.001; Yang Fan, Gong Zirui, Guo Mingming, et al. Morphological characteristics and influencing factors of gully heads in a typical agricultural watershed in rolling-hill black soil region of Northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 1-8.

## Morphological Characteristics and Influencing Factors of Gully Heads in a Typical Agricultural Watershed in Rolling-Hill Black Soil Region of Northeast China

Yang Fan<sup>1,2</sup>, Gong Zirui<sup>1</sup>, Guo Mingming<sup>2</sup>,

Zhang Libo<sup>1</sup>, Lu Wenlong<sup>1</sup>, Liu Xin<sup>2</sup>, Wang Baiyang<sup>3</sup>, Zhang Jingxue<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130061, China;

2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang

150001, China; 3.Institute of Water Conservancy Scientific Research of Jilin Province, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract:** [Objective] The morphological characteristics and influencing factors of a gully head in a typical agricultural watershed in the rolling-hill black soil region of Northeast China were studied in order to provide basic data and theoretical support for controlling gully erosion in a mollisols region. [Methods] The study was conducted for gully heads of a typical agricultural watershed in Hainan Township, Hailun City, Heilongjiang Province. The morphological characteristics of the gully heads, soil type, and soil configuration

收稿日期: 2024-01-31

修回日期: 2024-02-23

资助项目: 中国科学院东北地理与农业生态研究所青年科学家小组项目“典型黑土区多外营力驱动的坡沟系统土壤侵蚀机制与阻控对策研究”(2023QNXZ03); 国家自然科学基金项目“典型黑土区侵蚀沟岸裂隙形成—发育过程及其失稳机制”(42107356); 科技部重点研发子课题(2021YFD1500804); 吉林农业大学本科生科技创新基金(S202310193027)

第一作者: 杨帆(1987—), 男(汉族), 吉林省长春市人, 博士, 讲师, 主要从事水土保持方面研究。Email: yangfanjld@163.com。

通信作者: 巩子瑞(1997—), 男(汉族), 辽宁省沈阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: 18104304702@163.com。

were investigated in the field. The correlation between gully heads morphological characteristics and internal causes (soil characteristics) and external environmental factors were analyzed. [Results] ① At Hainan Township small watered the soil types of the cut gully head were typical black soil, meadow black soil, and alluvial soil. The soil structure consisted of mainly humus layer (A) + illuvial layer (B) + parent material layer (C) type, supplemented by humus layer (A) + parent material layer (C) type and humus layer (A) + parent material layer (C) + buried layer (Ab) type. ② Correlation analysis showed gully morphology was complicated by internal and external factors, and the single morphology was affected not only by internal and external factors, but also by its own morphology. ③ Redundancy analysis showed that the slope, soil configuration, and catchment area of the gully head were the main factors affecting gully head morphology, and were positively correlated with gully head morphology. The vegetation coverage of the gully head, the distance between crops and the gully head, the angle between the ridge and the gully head elevation were negatively correlated with gully head morphology. [Conclusion] The morphological characteristics of gully heads are complex, and the soil vertical difference is the fundamental internal factor. Gully head morphology is affected by both internal and external factors.

**Keywords:** rolling-hill; black soil region; gully head morphology; soil configuration

东北黑土区作为中国最大的商品粮基地,耕地面积和粮食总产量同时占全国的 1/4,是中国粮食安全的“压舱石”。然而,仅经过百余年的大规模开发,黑土厚度已由开垦前的 50—60 cm 锐减到目前的 30 cm 左右;水利部松辽水利委员会组织实施的东北黑土区侵蚀沟专项调查结果显示,2021 年东北黑土区已形成长度 50 m 以上的侵蚀沟  $6.67 \times 10^5$  余条,损毁耕地面积已达 4 029.57 km<sup>2</sup>,黑土区已成为中国急需治理的水土流失区域之一<sup>[1-2]</sup>。东北黑土区的农业用地主要为坡耕地,其特点是坡长大、坡度缓,坡耕地是东北黑土区水土流失最严重的地区,约 70% 以上的侵蚀沟发育于耕地中,且 90% 以上处于发展状态。

近年来,众多学者对黑土区沟蚀给予了充分关注,围绕漫川漫岗黑土农田区侵蚀沟时空演变、降雨期及融雪期沟蚀特征、沟蚀影响因子等方面取得了丰硕成果,但在沟头溯源侵蚀过程与机制方面则相对匮乏,对切沟沟头这一特殊部位的关注点较低。胡刚等<sup>[3]</sup>、伍永秋等<sup>[4]</sup>利用 RTK-GPS 技术对黑土区切沟沟头进行了监测,提出冻融侵蚀堆积—雨季径流侵蚀的切沟发育模式;刘绪军等<sup>[5]</sup>研究表明,冻融侵蚀在浅沟及切沟中效果显著;杨亚娟等<sup>[6]</sup>发现,冻融作用不仅使沟头出现冻裂、崩塌等现象,而且破坏沟头土壤结构,降低土壤抗蚀能力,加速沟头溯源侵蚀;Qi Jiarui 等<sup>[7]</sup>对 4 种不同土地利用类型沟头的抗蚀性及其影响因素进行了研究,结果表明土壤性质对于沟头抗蚀性的影响高于植物根系;齐佳睿<sup>[8]</sup>研究表明,沟头土壤崩解性能和上方汇水面积是影响沟头溯源侵蚀速率与沟头形态的主要因素。沟头作为连接坡面和沟道的重要节点,溯源过程中沟头会呈现不同的

形态特征,其影响因素是复杂的,然而,鲜有从内因以及外因共同作用条件下对切沟沟头形态影响的研究,因此,亟需加强该方向的研究。

为此,本文采用野外实地调查的方法对漫川漫岗黑土农田区切沟沟头的形态参数以及影响因素(内因、外因)进行调查,分析各影响因素对沟头形态的贡献,尤其是查明内外因共同作用下对沟头形态特征的影响,以期更好地了解水土保持沟壑侵蚀原理,为决策者提供依据,改善水土保持,控制沟壑侵蚀。

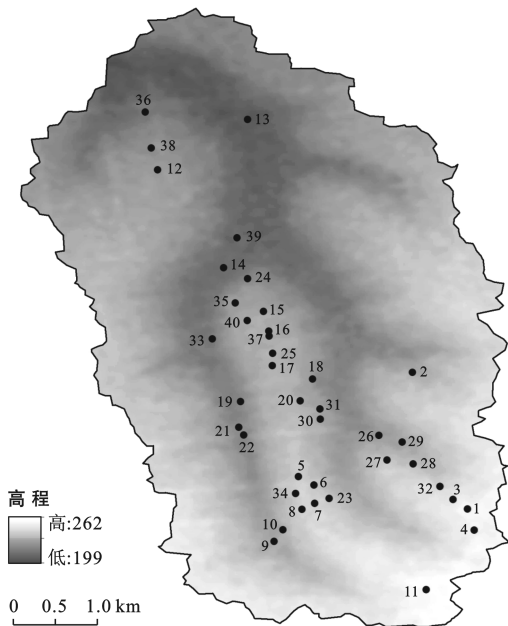
## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区(东经 126°50′—126°53′,北纬 47°13′—47°17′)位于黑龙江省海伦市海南乡小流域,面积 19.89 km<sup>2</sup>,耕地面积约占 88%。其地貌为黑土区典型的漫川漫岗地貌,海拔 199~262 m,坡长且平缓。研究区属温带大陆性季风气候,冬冷夏暖多雨,气温 -22~22 ℃,年平均气温 2 ℃,太阳照射时长为 2 600~2 800 h,年均有效积温( $\geq 10$  ℃)为 2 450 ℃,无霜期 120 d 左右。年降水量 430.62~882.90 mm,夏季(6—8 月)降水占 65%,冬季降雪占 9% 左右。研究区土壤类型以典型黑土为主,同时出露有草甸黑土以及冲积土,成土母质以黄土状亚黏土为主,辅以少量河湖相沉积物。研究区自 1897 年开始开垦,以垄作栽培为主,作物类型以玉米和大豆为主。由于高强度的开发与耕作,土壤侵蚀使土层厚度减少到平均 30 cm 深,土壤有机质减少了 60%,并且仍在以每年 0.1 g/kg 的速度流失,土壤自然生产力降低了 20%。更严重的是,在特定的土壤和地形条件下,耕作加速了农田沟壑的形成和发展,使耕地面积减少 2.8%<sup>[9]</sup>。

## 1.2 研究方法

1.2.1 野外调查 2023年10月秋收后采用野外实测调查的方法调查海南乡小流域约20 km<sup>2</sup>范围内的全部40个切沟沟头(图1)。运用野外剖面实测法,根据剖面形态特征差异(目视特征:颜色、根系、砾石、胶膜、土壤结构、侵入体、石灰反应等差异;触觉特征:质地、结持性、坚硬度等差异)对土壤发生层进行划分,记录各发生层的详细特征,野外判定土壤发生学分类;用皮尺、钢尺、罗盘、量角器、坡度尺等对沟头的形态参数(沟头宽度、曲线长度、宽度、深度、沟壁坡度、内凹洞形态、跌水潭形态、跌落物等)、地形特征以及作物覆盖情况(沟头上方坡度、汇水面积、植被覆盖度、作物到沟头距离、沟头垄向与沟头立面夹角)进行测定。



注:图中1—40为切沟沟头编。下同。

图1 黑龙江省海伦市海南乡典型农业小流域切沟沟头分布

Fig.1 Distribution of gully heads in a typical agricultural watershed at Hainan Township, Hailun City, Heilongjiang Province

1.2.2 数据获取 汇水区圈定与汇水面积确定方法。采用大疆无人机对研究区进行50 m高度低空摄影,图片重叠率70%以上,运用绘图软件对图片进行处理获取DEM影像数据,使用ArcGIS软件对生成的DEM等值线处理,获得研究区域汇水区1:2 000等高线,手动圈出切沟沟头汇水区并计算汇水区面积。

1.2.3 数据分析与处理 运用Office 2010软件对数据进行整理和初步分析,统计学分析利用SPSS 25软件进行,使用Origin 2022软件进行图件绘制。

采用Pearson相关分析和冗余分析法分析方法对沟头形态与内外因素的相关性进行分析。Pearson

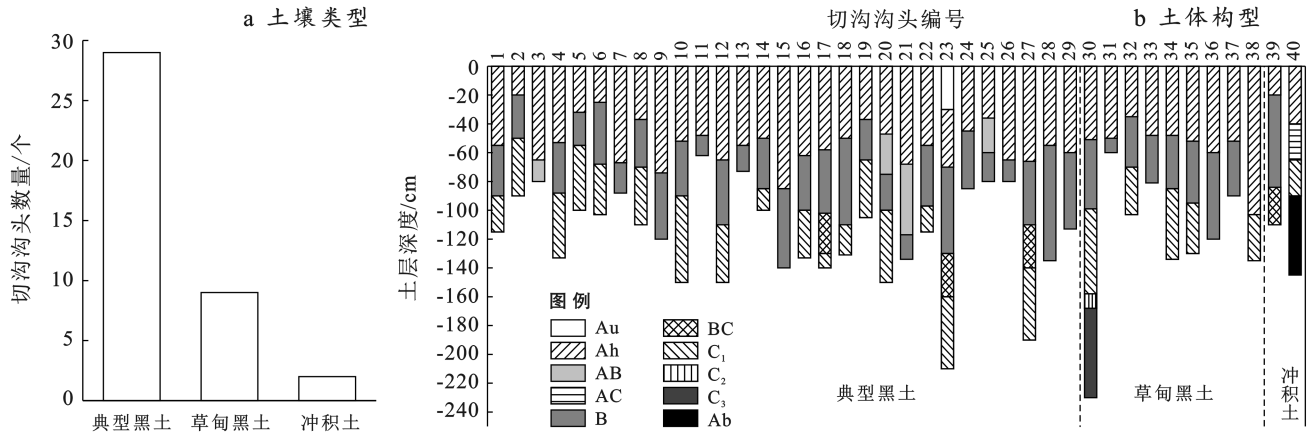
相关分析是用于测量两变量相关程度的分析,通过获取Pearson相关系数进而反映两个变量的线性相关程度,Pearson相关系数用 $r$ 表示, $n$ 为样本量,它们是两个变量的观测值和均值。 $r$ 用以表征两个变量之间的相关程度, $r$ 的绝对值越大表明相关性越强。Pearson相关系数中 $p$ 值为检验值,作为检验双变量在样本总体中是否存在和样本一样的相关性, $p \leq 0.05$ 表示两变量有明显相关性, $p \leq 0.01$ 表示两变量具有极显著相关性;冗余分析RDA(redundancy analysis),实质上为一种回归分析结合主成分分析的排序方法,也是多响应变量回归分析的拓展。RDA分析主要反映响应变量矩阵与解释变量之间的关系,即沟头形态与内外影响因素之间的关系。RDA分析相对于主成分分析而言,其优势在于可以看出不同影响因子对不同形态特征的相应情况。本研究采用Canoco 5.02软件进行RDA分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 沟头土壤类型、土体构型及外部环境因素特征

如图2所示,基于野外调查数据,研究区切沟沟头土壤类型主要为典型黑土、草甸黑土以及冲积土(图2),其比例分别为72.5%,22.5%以及5%。

典型黑土主要分布在台地及高阶地等部位,成土母质多为黄土状亚黏土,土壤剖面构型由腐殖质层(A)+淀积层(B)+母质层(C)组成,A层厚约25—70 cm,(黏)壤土,团粒状,根系数量中等,结持性疏松,B层壤质黏土,多呈团块状,根系数量较少,结持性疏松—稍紧实,土壤结构表面多见二氧化硅粉末,C层多为黄土状亚黏土,团块或单粒,无根系,结持性稍紧实。草甸黑土主要分布在台地下部,漫岗坡脚处,俗称“二洼地”,地下水位较高,土壤剖面构型由腐殖质层(A)+淀积层(B)+母质层(C)组成,A层厚20—85 cm,(黏)壤土,团粒状,根系数量中等,结持性疏松;B层多为壤质黏土,团块状,根系少量,结构体表面发育锈纹锈斑,C层多见黄土状亚黏土,团块或单粒,结持性稍紧实。冲积土多分布在河谷低平地,属于A+C+(Ab(埋藏层))型土体构型,A层厚40—100 cm,多为冲积物,局部可见弱层理及侵入体,团块或单粒,根系少量,局部见少量砾石,多呈浑圆状,C层多为冲洪积物,部分为河湖相沉积物,Ab层为埋藏层,厚约20—50 cm,可见典型黑土构型。统计表明,研究区切沟土体构型以A+B+C型为主,A+C及A+C+Ab型为辅(图2),就切沟出露土壤层次而言,切沟出露土壤层次多至C层(65%),切至B层占比35%。



注: Au 为淤积层; Ah 为腐殖质层; AB 为过渡层; AC 为过渡层; B 为淀积层; BC 为过渡层; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> 为母质细分层; Ab 为埋藏层。

图 2 海南乡小流域切沟沟头土壤类型及土体构型

Fig. 2 Soil type and soil configuration of gully head at Hainan Township small watershed

调查显示沟头坡度整体介于  $3^{\circ} \sim 20^{\circ}$  之间,其中典型黑土平均坡度  $10.2^{\circ}$ ,草甸黑土平均坡度介于  $7.22^{\circ}$ ,冲积土平均坡度  $6.5^{\circ}$ ,就平均坡度而言,3 种土壤类型沟头坡度递减。汇水面积整体介于  $6\ 247.5 \sim 25\ 840.1\ \text{m}^2$ ,典型黑土平均汇水面积  $13\ 861.99\ \text{m}^2$ ,草甸黑土平均汇水面积  $18\ 775.43\ \text{m}^2$ ,冲积土平均汇水面积  $9\ 492.90\ \text{m}^2$ 。典型黑土沟头植被覆盖度变化区间较大,介于  $5\% \sim 95\%$  之间,平均值  $31\%$ ;草甸黑土沟头植被覆盖度变化区间适中,介于  $2\% \sim 60\%$  之间,平均值  $26\%$ ;冲积土沟头植被覆盖度变化区间较小,介于  $30\% \sim 60\%$  之间,平均值  $45\%$ 。沟头作物距沟头距离介于  $0 \sim 5.07\ \text{m}$ ,其中  $0\ \text{m}$  占比  $15\%$ 。沟头垄向与沟头立面夹角除个别沟头外,整体介于  $15^{\circ} \sim 90^{\circ}$  之间,大于  $45^{\circ}$  的占比  $69\%$ 。

## 2.2 沟头形态特征

沟头宽—深比不仅可以表征沟头的宽窄程度,同时也可以在一定程度上反映沟头作用方式。各土壤类型沟头宽—深比见表 1。整体上,切沟沟头宽—深比介于  $0.22 \sim 7.88$  之间,其中典型黑土沟头宽—深比介于  $0.45 \sim 7.88$  之间,平均值  $1.65$ ;草甸黑土沟头宽—深比介于  $0.22 \sim 2.50$  之间,平均值  $1.25$ ;冲积土沟头宽—深比介于  $0.73 \sim 1.03$  之间,平均值  $0.88$ ,就土壤类型而言,典型黑土的沟头宽—深比均值最大,冲积土的沟头宽—深比均值最小。

野外长期监测表明,沟壁坡度大易形成内凹洞,在径流及重力的双重作用下上部土体易失稳发生崩塌,导致沟头溯源挺进,一般而言,沟壁坡度越大,沟头活性越强。研究区各切沟沟头沟壁坡度除两条切沟外(11 号坡度  $88.2^{\circ}$ ,2 号  $89.3^{\circ}$ ),其他切沟均发育内凹洞形成负地形,统一记作  $90^{\circ}$ (表 1)。沟头“上凸下凹”的内凹洞形态为沟壁上部的崩塌提供了临空

条件<sup>[10]</sup>,随着内凹洞的不断加大,当上部土体突破承受极限时,土体便发生崩塌。一般而言,土壤分层构型、沟头深度等共同控制内凹洞形态。各切沟沟头内凹洞形态见表 1,除上述两条切沟(2,11 号)不发育内凹洞外,其深度介于  $1 \sim 117\ \text{cm}$ ,宽度介于  $1 \sim 125\ \text{cm}$ ,深—宽比整体介于  $0.09 \sim 6$  之间。跌水潭受土壤质地、沟头深度及径流能量等影响<sup>[11]</sup>。典型黑土跌水潭深度介于  $4 \sim 120\ \text{cm}$  之间,宽度介于  $5 \sim 160\ \text{cm}$  之间,宽深比为  $0.05 \sim 8$ ;草甸黑土跌水潭深度介于  $5 \sim 32\ \text{cm}$  之间,宽度介于  $34 \sim 61\ \text{cm}$  之间,宽深比为  $1.42 \sim 8$ ;冲积土跌水潭深度为  $8\ \text{cm}$ ,宽度介于  $19 \sim 53\ \text{cm}$  之间,宽深比介于  $2.38 \sim 6.63$  之间。

## 2.3 影响沟头形态的因素

为了更好的理解沟头形态与内外影响因素之间的关系,本研究采用相关性分析方法筛选分析了沟头形态特征〔沟壁坡度(GB)、沟头宽度(ZXC)、沟头曲线长(QXC)、沟头深度(GGD)、内凹洞产出部位(NBW)、内凹洞距沟顶距离(NJS)、内凹洞距沟底距离(NJX)、内凹洞高度(NGD)、内凹洞宽度(NKD)、内凹洞深度(NSD)、跌水潭深度(DSD)、跌水潭长度(DCD)、跌水潭宽度(DKD)、堆积物长度(WCD)、堆积物宽度(WKD)、堆积物高度(WGD)]与内因〔土壤类型(LX)、土体构型(GX)、土壤质地(ZD)、土壤结构(JG)、土壤根系数量(GXL)、结持性(JCX)]和外部环境因素〔沟头坡度(PD)、沟头植被覆盖度(ZB)、作物距沟头距离(JL)、沟头垄向与沟头立面夹角(JJ)、汇水面积(HS)]共计 11 个影响因素的相关性(图 3)。

由图 3 可知,沟头宽度与汇水面积极显著正相关,相关系数  $0.43 (p \leq 0.001)$ ,与沟头植被覆盖度呈极显著负相关,相关系数为  $-0.28$ ;沟头曲线长受沟头坡度与汇水面积的极显著影响,相关系数分别为

0.36, 0.38 ( $p \leq 0.001$ ), 与沟头植被覆盖度呈显著负相关 ( $p \leq 0.05$ ); 沟头深度受土体构型、土壤结构、土壤质地以及汇水面积多因素影响且呈现极显著性相关, 相关系数分别为 0.64, 0.25, 0.20, 0.21 ( $p \leq 0.01$ ), 与沟头垄向和沟头立面夹角呈显著负相关 ( $p \leq 0.01$ ), 相关系数为 -0.25; 内凹洞形态(高度、宽度及深度)与沟头深度、沟壁坡度、土体构型以及汇水面积呈正相关显著影响 ( $p \leq 0.05$ ), 内凹洞出露位置则与作物距沟头距离、沟头垄向与沟头立面夹角、沟头深度呈

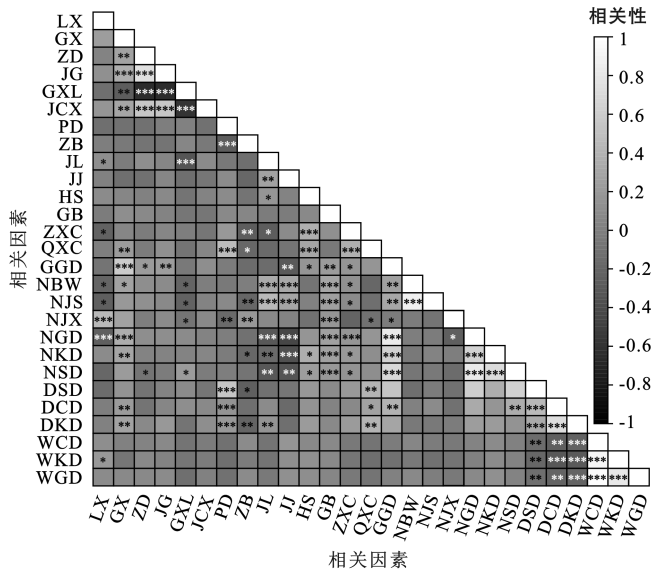
极显著正相关 ( $p \leq 0.01$ ), 与土体构型和沟头宽度呈显著性正相关 ( $p \leq 0.05$ ), 与土壤类型及土壤根系数呈负相关 ( $p \leq 0.05$ ); 跌水潭长度、宽度、深度与沟头坡度呈极显著正相关性 ( $p \leq 0.001$ ), 与土体构型和沟头曲线长呈显著性正相关 ( $p \leq 0.01$ ), 与植被覆盖度呈显著负相关 ( $p \leq 0.01$ ); 跌落物的形态与跌水潭形态呈极显著性负相关 ( $p \leq 0.01$ ), 二者为此消彼长的趋势。初步筛选出土体构型、汇水面积、沟头坡度等是沟头形态特征主要的影响因素。

表 1 海南乡小流域沟头形态特征

Table 1 Morphological characteristics of gully head at Hainan Township small watershed

序号	土壤类型	沟壁坡度/ (°)	沟头宽度/ cm	沟头曲线长/ cm	沟头深度/ cm	宽深比	内凹洞距顶/ cm	内凹洞距底/ cm	内凹洞高度/ cm	内凹洞宽度/ cm	内凹洞深度/ cm	内凹洞在土层位置	跌水潭深度/ cm	跌水潭长度/ cm	跌水潭宽度/ cm	堆积物长度/ cm	堆积物宽度/ cm	堆积物高度/ cm
1		90*	175	220	115	1.52	20	8	87	37	40	A-C	8	70	40	—	—	—
3		90*	160	240	77	2.1	65	2	10	1	6	AB	4	23	14	—	—	—
6		90*	120	140	103	1.17	16	5	82	45	10	A-C	20	52	65	—	—	—
7		90*	55	134	88	0.63	5	4	79	28	10	A-B	9	37	30	—	—	—
8		90*	65	110	111	0.59	27	2	82	50	20	A-C	—	—	—	—	—	—
9		90*	86	120	120	0.72	55	50	15	50	13	A	30	50	45	—	—	—
10		90*	170	260	150	1.13	54	24	72	25	14	B-C	12	42	31	52	18	52
11		88.2	80	150	62	1.29	—	—	—	—	—	—	4	23	14	—	—	—
12		90*	270	350	150	1.80	20	50	80	100	40	A-B	—	—	—	—	—	—
13		90*	290	600	73	3.97	50	2	21	5	5	A-B	100	24	5	—	—	—
14		90*	150	170	97	1.55	40	19	38	8	10	A-B	6	41	30	—	—	—
16		90*	160	210	133	1.20	32	35	66	12	10	A-B	9	28	39	—	—	—
19	典型黑土	90*	230	330	105	2.19	8	11	76	12	11	A-C	25	60	80	—	—	—
20		90*	160	50	180	0.89	115	8	56	55	40	C	8	114	36	—	—	—
21		90*	120	140	134	0.90	6	11	117	32	23	A-B	—	—	—	—	—	—
22		90*	97	170	115	0.84	100	55	50	11	15	C	31	63	52	—	—	—
23		90*	325	560	210	1.55	30	5	125	75	35	Ah-BC	40	130	160	—	—	—
24		90*	140	180	100	1.40	37	7	56	15	9	A-B	14	31	54	—	—	—
25		90*	56	60	80	0.70	40	12	20	28	19	AB	—	—	—	—	—	—
26		90*	630	270	80	7.88	20	10	50	40	40	A-B	50	30	15	—	—	—
27		90*	150	440	330	0.45	30	0	300	125	117	A-C	120	100	53	—	—	—
28		90*	110	140	132	0.83	49	7	74	23	25	A-B	17	112	50	—	—	—
29	90*	280	340	114	2.46	40	8	66	75	30	A-B	5	60	40	—	—	—	
30	90*	300	210	230	1.30	110	20	100	30	10	C <sub>1</sub> -C <sub>3</sub>	0	0	0	—	—	—	
32	90*	330	400	103	3.20	35	2	73	17	11	B-C	10	50	70	—	—	—	
33	90*	133	190	81	1.64	5	7	69	20	61	A-B	—	—	—	21	22	19	
35	90*	73	322	130	0.56	90	2	38	14	1	B-C	11	70	41	—	—	—	
37	90*	180	190	90	2.0	20	0	70	20	16	A-B	4	35	18	—	—	—	
39	90*	160	240	110	1.45	20	55	35	22	2	A-B	—	—	—	—	—	—	
2		89.3	136	480	90	1.51	—	—	—	—	—	—	5	60	40	—	—	—
4		90*	120	200	133	0.90	50	23	60	30	12	A-C	24	54	34	—	—	—
5		90*	100	770	91	1.10	30	50	11	20	2	A-B	10	55	40	—	—	—
15	草甸黑土	90*	150	160	140	1.07	15	10	115	30	20	A-B	20	150	45	—	—	—
17		90*	142	171	140	1.01	33	10	97	87	24	A-BC	—	—	—	43	30	47
18		90*	180	270	120	1.50	67	6	47	62	11	B-C	7	23	61	—	—	—
31		90*	150	160	60	2.50	14	16	20	17	4	A	—	—	—	30	33	7
34		90*	30	80	134	0.22	10	90	34	22	14	A	32	53	60	—	—	—
36	90*	175	200	120	1.46	76	11	33	107	14	B	8	13	46	—	—	—	
38	冲积土	90*	98	145	135	0.73	9	30	16	2	2	A	8	28	19	—	—	—
40		90*	150	180	145	1.0	8	82	55	70	26	A-AC	8	60	53	—	—	—

注:90\* 表示沟壁有内凹洞,形成负地形,统一记作 90\*。



注: (1) 图中字母组合分别代表了 3 组影响因素①沟头形态特征〔沟壁坡度(GB)、沟头宽度(ZXC)、沟头曲线长(QXC)、沟头深度(GGD)、内凹洞产出部位(NBW)、内凹洞距沟顶距离(NJS)、内凹洞距沟底距离(NJX)、内凹洞高度(NGD)、内凹洞宽度(NKD)、内凹洞深度(NSD)、跌水潭深度(DSD)、跌水潭长度(DCD)、跌水潭宽度(DKD)、堆积物长度(WCD)、堆积物宽度(WKD)、堆积物高度(WGD)]; ②内因〔土壤类型(LX)、土体构型(GX)、土壤质地(ZD)、土壤结构(JG)、土壤根系数量(GXL)、结持性(JCX)]; ③外部环境因素〔沟头坡度(PD)、沟头植被覆盖度(ZB)、作物距沟头距离(JL)、沟头垄向与沟头立面夹角(JJ)、汇水面积(HS)〕。(2) \* 表示  $p \leq 0.05$ ; \*\* 表示  $p \leq 0.01$ ; \*\*\* 表示  $p \leq 0.001$ 。

图 3 海南乡小流域沟头形态与内外因素相关性

Fig.3 Correlation between gully head morphology and internal and external factors at Hainan Township small watershed

综上所述,沟头形态与内外因素呈现复杂的相关性,单一形态不仅受内外因素的影响,同时受自身形态的共同作用影响,仅从相关性分析难以判定沟头形态的影响过程,需结合其他分析进行综合判断。

### 3 讨论

#### 3.1 内外因素对沟头形态的影响分析

如图 4 所示,RDA 分析可以直观呈现出不同影响因素对沟头不同形态特征的响应情况。

RDA 双排序图中,实线代表沟头形态特征,虚线代表内外因素,箭头长度代表内外因素影响沟头形态的强度,箭头与排序轴之间的夹角代表该箭头所示因子与排序轴之间的相关性,线与线间的夹角代表两者的相关性,夹角越小,相关性越强, $\leq 90^\circ$ 代表正相关, $> 90^\circ$ 代表负相关。内外因素对沟头形态的冗余分析(图 4)表明,第一、第二排序轴上内外因素与沟头形态的相关系数分别为 0.728、0.557,解释了方差的 83.46%

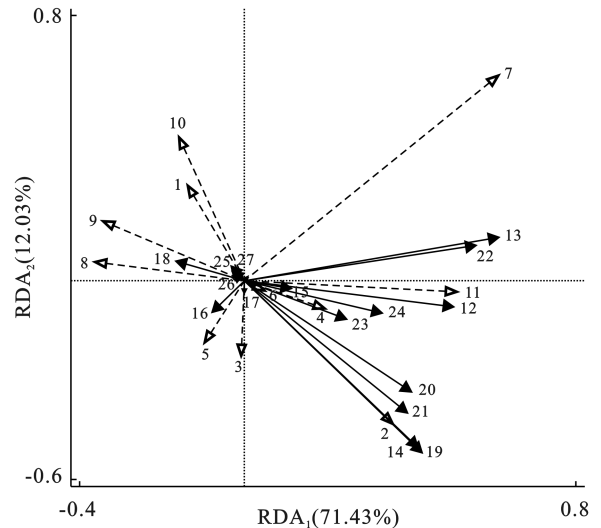
$$\text{沟头深度} = 97.290 - 0.384 \text{ ZB} - 0.334 \text{ JJ} + 29.393 \text{ GX} - 21.126 \text{ LX} + 0.002 \text{ HS} \quad (R^2 = 0.466, p \leq 0.001) \quad (1)$$

$$\text{沟头宽度} = 136.154 - 0.893 \text{ ZB} - 0.245 \text{ JL} - 42.230 \text{ LX} + 0.007 \text{ HS} \quad (R^2 = 0.358, p \leq 0.001) \quad (2)$$

$$\text{内凹洞深度} = 24.452 - 0.144 \text{ ZB} - 0.042 \text{ JL} - 0.164 \text{ JJ} + 4.042 \text{ GX} - 9.108 \text{ LX} + 0.001 \text{ HS} \quad (R^2 = 0.301, p \leq 0.001) \quad (3)$$

$$\text{跌水潭深度} = -1.553 + 4.836 \times \text{GX} + 1.416 \times \text{PD} \quad (R^2 = 0.368, p \leq 0.001) \quad (4)$$

(第一排序轴 71.43%,第二排序轴 12.03%),内外因素能很好的解释沟头形态差异,土体构型、汇水面积、土壤结构、沟头坡度与沟头形态(沟头深度、沟头宽度和曲线长、内凹洞形态、跌水潭形态)关系最强且呈正相关关系;作物与沟头的距离、沟头植被盖度、沟头垄向和沟头立面夹角则与沟头形态呈负相关关系,对沟头的形成具有抑制作用。



注:1 为土壤类型;2 为土体构型;3 为土壤质地;4 为土壤结构;5 为土壤根系数量;6 为土壤结持性;7 为沟头坡度;8 为沟头植被覆盖度;9 为作物距沟头距离;10 为垄向与沟头立面夹角;11 为汇水面积;12—14 为沟头宽度、曲线长度、深度;15 为沟壁坡度;16 为内凹洞产出部位;17—18 为内凹洞距沟顶、底距离;19—21 为内凹洞高度、宽度、深度;22—24 为跌水潭深度、长度、宽度;25—27 为堆积物长度、宽度、高度。

图 4 内外因素对沟头形态特征的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis of morphology characteristics of gully head by internal and external factors

为进一步明确内外因素对沟头形态特征的影响,选取汇水面积(HS)、土体构型(GX)、土壤类型(LX)、沟头植被覆盖度(ZB)、作物距沟头距离(JL)、沟头垄向与沟头立面夹角(JJ)、沟头坡度(PD)等指标与沟头主要形态指标进行逐步回归分析。结果表明,沟头深度受土体构型、土壤类型、植被覆盖度、汇水面积以及沟头垄向与沟头里面夹角显著影响,其拟合方程式为(1);沟头宽度受汇水面积、植被覆盖度、土壤类型、土体构型以及沟头距作物距离显著影响,拟合公式为(2);内凹洞深度受汇水面积、土壤类型、土体构型、植被覆盖度、沟头距作物距离以及沟头垄向与沟头立面夹角极显著影响,拟合公式为(3);跌水潭深度受土体构型以及沟头坡度的显著影响,拟合公式为(4)。

### 3.2 土体构型对沟头形态的影响分析

前人对于黑土区沟头形态的研究,多聚焦在外部因素与沟头形态的相关关系上,过于强调外部因素的影响,忽略了土壤本身属性对于沟头形态的指示意义,因此有必要从内外因共同作用的视角深入理解沟头形态的变化。黑土地地区成土母质主要为中更新统黄土状亚黏土,第四纪更新世开始,受新构造运动的影响,地层逐渐升起形成山前洪积平原,而后由于气候、地形、植被等多因素的共同作用成壤,成壤过程中的淋溶淀积过程导致土壤分层明显,其土壤垂向差异性特征有别于黄土高原以及南方崩岗地区。本研究表明土体构型显著影响沟头形态,不同土体构型沟头形态差距显著,这与 Robinson K.M.等<sup>[12]</sup>的研究相吻合,不同土层之间的抗蚀能力和抗剪强度等指标差异性形成沟头不同形态的必要原因<sup>[13]</sup>。而土壤质地、土壤结构、土壤结持性等内在因素共同影响并决定土体构型,其垂向非均质差异性是影响沟头形态的内在因素,土壤质地、结构和结持性等作为黑土分层的基本属性<sup>[10-11]</sup>,不同层的抗蚀性、抗冲性、渗透率等决定了沟头内凹洞与跌水潭的形态以及内凹洞的产出部位。王斌科<sup>[14]</sup>通过对黄土结构及质地研究发现,“新、老黄土”节理、质地差异性显著影响土壤渗透率<sup>[15]</sup>及抗冲性,进而导致沟头形态的明显差异性;Xu Jinzhong等<sup>[16]</sup>研究表明,黑土下伏不透水层(黄土质母质层)的存在导致沟头形成滑动面,并产生沟头裂隙,促进沟头溯源侵蚀,是沟头不同土体构型下外在的形态显示,与本次研究结果相一致。

### 3.3 外部因素(地形因子、耕作措施)对沟头形态的影响分析

沟头坡度和汇水面积是影响沟头形态的2个重要地形因子,已有研究表明,沟头侵蚀速率与汇水面积和坡度的乘积呈极显著线性相关关系<sup>[17-18]</sup>,坡度和汇水面积可以增加沟头汇流流速,其不仅可以促进跌水潭的形成,同时可以加剧内凹洞的侵蚀<sup>[19-20]</sup>,本研究也证明了这一点,沟头跌水潭形态特征与沟头坡度呈极显著相关性( $p \leq 0.001$ )。沟头垄向与沟头立面夹角作为农田地区的特殊因子,其不仅改变了微地形,同时改变了沟头局部位置的汇流量,当沟头垄向与沟头立面夹角过小时,其通过增加汇水流量间接地影响沟头形态。沟头植被及作物覆盖对沟头形态起到重要作用<sup>[21]</sup>,其作用机制是多方面的,植被根系可以通过改变土壤理化性质影响沟头形态<sup>[22-23]</sup>,植被根系不仅优化土壤结构、提高土壤入渗率和抗剪强度,还可以提高表层土壤自身的抗蚀性能<sup>[24]</sup>,内凹洞产出部位与植被根系数量呈显著负相关即是证明。沟

头植被还通过地上部分截留雨水和地下部分稳定松散土壤改善入渗条件改变沟头水文过程,从而改变土壤侵蚀过程,进而影响沟头形态<sup>[25-28]</sup>,从空间变化上来讲,不同植被和作物覆盖条件下的沟头形态在同一时段下差异明显<sup>[29]</sup>。综上所述,沟头外部因素有其自身的影响特性,同时还可以通过改善土壤理化属性(内因)间接影响沟头形态,其影响过程复杂多变。

## 4 结论

本研究基于野外实测,在东北漫川漫岗黑土区典型农业小流域对40个切沟的沟头土壤类型、沟头形态特征进行了调查,应用相关性分析以及冗余分析等方法对沟头形态与其影响因素进行了分析。主要结论如下:

(1) 沟头土壤类型为典型黑土、草甸黑土和冲积土,土体构型以腐殖质层(A)+淀积层(B)+母质层(C)型为主,腐殖质层(A)+母质层(C)型及腐殖质层(A)+母质层(C)+埋藏层(Ab)型为辅。

(2) 沟头形态受内外因素共同影响,土体构型、汇水面积是影响沟头形态的主要因子且与沟头形态呈正相关关系,沟头植被覆盖度、作物距沟头距离、土壤类型等与沟头形态呈负相关关系。

(3) 土壤质地、土壤结构、土壤结持性等内在因素共同影响并决定土体构型,土壤内因通过影响土壤垂向抗蚀性、抗冲性等影响沟头形态。

### 参考文献(References)

- [1] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59.  
Zheng Fenli, Xu Ximeng, Qin Chao. A review of gully erosion process research [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8):48-59.
- [2] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.  
Zhang Guanghui. Several ideas related to soil erosion research [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(4):21-30.
- [3] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.GPS和GIS进行短期沟蚀研究初探:以东北漫川漫岗黑土区为例[J].水土保持学报,2004,18(4):16-19.  
Hu Gang, Wu Yongqiu, Liu Baoyuan, et al. Preliminary research on short-term channel erosion using GPS and GIS [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(4):16-19.
- [4] 伍永秋,刘宝元.切沟、切沟侵蚀与预报[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(2):134-142.

- Wu Yongqiu, Liu Baoyuan. Gully, gully erosion and prediction [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2000,8(2):134-142.
- [5] 刘绪军,景国臣,杨亚娟,等.冻融交替作用对表层黑土结构的影响[J].*中国水土保持科学*,2015,13(1):42-46.  
Liu Xujun, Jing Guochen, Yang Yajuan, et al. Effects of alternate freezing and thawing on the structure of black topsoil [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015,13(1):42-46.
- [6] 杨亚娟,景国臣,刘绪军,等.冻融作用对黑土区侵蚀沟发育的影响[J].*水土保持通报*,2015,35(3):1-5.  
Yang Yajuan, Jing Guochen, Liu Xujun, et al. Effects of freezing and thawing cycling on development of eroded gully in black soil area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015,35(3):1-5.
- [7] Qi Jiarui, Guo Mingming, Zhou Pengchong, et al. Soil erosion resistance factors in different types of gully heads developed in four main land-uses in the mollisols region of Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023,230:105697.
- [8] 齐佳睿.典型黑土区切沟沟头土壤抗蚀性与溯源特征研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北农业大学,2023.  
Qi Jiarui. Research on the soil anti-erodibility and migration rate of gully heads in the typical mollisol region of Northeast China [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2023.
- [9] Zhang Shengmin, Guo Mingming, Liu Xin, et al. Historical evolution of gully erosion and its response to land use change during 1968—2018 in the mollisol region of Northeast China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.08.001>.
- [10] 缪驰远,刘宝元,刘刚,等.东北典型黑土区剖面粒径分布特征及其可蚀性研究[J].*水土保持学报*,2008,22(3):18-23.  
Miao Chiyuan, Liu Baoyuan, Liu Gang, et al. Study on particle distribution and its erodibility in typical black soil area of Northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008,22(3):18-23.
- [11] 葛建,黄德文,高旭,等.分层土壤的持水性能研究[J].*西南农业学报*,2019,32(9):2126-2132.  
Ge Jian, Huang Dewen, Gao Xu, et al. Water retention capacity of drained soil columns with grained layers [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019,32(9):2126-2132.
- [12] Robinson K M, Hanson G J. Large-scale headcut erosion testing [J]. *Transactions of the ASAE*, 1995,38(2):429-434.
- [13] 刘子轩,高钰淇,陈家宙,等.土体构型对花岗岩红壤细沟发育形态的影响[J].*水土保持学报*,2023,37(6):74-82.  
Liu Zixuan, Gao Yuhao, Chen Jiazhou, et al. Influence of soil configuration on the morphology of the rill development in granitic red soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(6):74-82.
- [14] 王斌科.引起洞穴侵蚀的主要因素探索[J].*水土保持学报*,1989,3(3):84-90.  
Wang Binke. A study on main factors affecting tunnel erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989,3(3):84-90.
- [15] 任利东,黄明斌,樊军.不同类型层状土壤持水能力的研究[J].*农业工程学报*,2013,29(19):105-111.  
Ren Lidong, Huang Mingbin, Fan Jun. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013,29(19):105-111.
- [16] Xu Jinzhong, Li Hao, Liu Xiaobing, et al. Gully erosion induced by snowmelt in Northeast China: A case study [J]. *Sustainability*, 2019,11(7):2088.
- [17] Bacellar L de A, Coelho Netto A L, Lacerda W A. Controlling factors of gully erosion in the Maracujá Catchment, Southeastern Brazil [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005,30(11):1369-1385.
- [18] Saxton N, Olley J, Smith S, et al. Gully erosion in Sub-tropical South-east Queensland, Australia [J]. *Geomorphology*, 2012,173:80-87.
- [19] 顾广贺,范昊明,王岩松,等.东北 3 个典型区冲沟形态发育特征及其成因[J].*水土保持通报*,2015,35(3):30-33.  
Gu Guanghe, Fan Haoming, Wang Yansong, et al. Morphologies characteristics and driving factors of gullies in black soil region of Northeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015,35(3):30-33.
- [20] Samani A N, Chen Qiuwen, Khalighi S, et al. Assessment of land use impact on hydraulic threshold conditions for gully head cut initiation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016,20:3005-3012.
- [21] 陈卓鑫,郭明明,王文龙,等.白草塬植被恢复后沟头草本植物多样性与土壤因子的关系[J].*水土保持通报*,2023,43(4):53-60.  
Chen Zhuoxin, Guo Mingming, Wang Wenlong, et al. Relationship between herbaceous plant diversity and soil factors at a gully head after revegetation in Baicao tableland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(4):53-60.
- [22] De Baets S, Poesen J, Gyssels G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow [J]. *Geomorphology*, 2006,76(1/2):54-67.
- [23] Kang Hongliang, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. How does land use/cover influence gully head retreat rates? An in-situ simulation experiment of rainfall and upstream inflow in the gullied loess region, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(9):2789-2804.