引用格式: 贯丛, 张树文, 王让虎, 等. 三岔河流域坡耕地垄向与侵蚀沟分布耦合分析[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 394-404.
[Guan C, Zhang S W, Wang R H, et al. Coupling analysis between ridge direction and gully erosion of sloping cultivated lands in the Sancha River watershed[J]. *Resources Science*, 2019, 41(2): 394-404.] DOI :10.18402/resci.2019.02.17

三岔河流域坡耕地垄向与侵蚀沟分布耦合分析

贯丛^{1,2,3}, 张树文², 王让虎⁴, 杨久春², 岳书平⁵, 于灵雪², 王文娟⁶

(1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102;

3. 长春工程学院, 长春 130012; 4. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006;

5. 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044; 6. 河南财经政法大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要:黑土区坡耕地的侵蚀沟发育发展与耕作措施密切相关, 垄向分布对沟蚀的影响机制研究能够为黑土区采取更合理有效的耕种措施提供科学依据。本文以东北典型黑土区的三岔河流域为研究区, 基于2013年地理国情普查提供的高精度基础数据获取耕地垄向和侵蚀沟数据, 对沟蚀密度和裂度与耕地垄向角之间的关系进行定量分析, 并研究了不同垄向下沟蚀与地形的耦合作用。研究结果表明: ①研究区坡耕地横坡耕作的趋势非常明显; ②研究区耕地沟蚀强度为中度侵蚀; ③耕地垄向角与沟蚀密度和裂度显著负相关, 即随着垄向角的增大, 研究区耕地的平均沟蚀密度和裂度呈线性下降趋势, 横坡垄中的侵蚀沟密度和裂度最大, 其中垄向角和沟蚀密度的线性拟合效果最好, 沟蚀裂度稍差; ④不同耕地垄向中的侵蚀沟分布具有明显的地形分异特征: 当海拔大于280 m时, 各垄向耕作都不能有效地抵御侵蚀沟的产生; 当坡度大于15°时, 横坡垄中的沟蚀裂度最小, 但仍高于缓坡各垄向耕地中的沟蚀裂度; 各耕作垄向在阴坡对侵蚀沟面积的影响无明显差异。

关键词:地理国情普查; 坡耕地; 垄向; 侵蚀沟; 耦合分析; 东北典型黑土区; 三岔河流域

DOI :10.18402/resci.2019.02.17

1 引言

东北黑土区是我国重要的商品粮基地, 但高强度的开垦加上耕地资源的不合理利用, 造成该地区逐渐成为我国土壤侵蚀最严重的地区之一^[1,2], 尤其是侵蚀沟发育广泛^[3]。沟蚀能够造成大量土壤的流失和退化, 通常切沟的出现意味着土地退化已经发展到一种极端形式^[4], 因此侵蚀沟被视为土地退化最为显著的标志^[5]。黑土区的侵蚀沟从近代开始迅速发展, 吞噬耕地, 日益威胁着国家粮食安全, 也严重制约着区域经济社会的可持续发展。

目前国内外学者针对黑土区的沟蚀问题开展了

大量研究, 包括不同尺度上的沟蚀动态变化监测^[6-8]、地貌临界模型^[9]、发育特征^[3]、地理分区^[10]、沟蚀与自然地形要素之间的关系^[11,12]等, 人类活动对沟蚀的影响研究多集中在土地利用方式对沟蚀分布的影响^[13]。已有研究表明, 黑土区农业开垦与耕作是导致黑土流失的主要原因^[3], 农耕是加速沟蚀的重要人为因素^[14], 而垄作是黑土区一种非常普遍的耕作方式, 垄向的存在会对径流产生重大影响, 具有一定的水土保持效应^[15,16]。郑粉莉研究团队利用降雨模拟实验探讨了黑土区坡耕地顺坡垄作、横坡垄作与无垄作坡面的土壤侵蚀对比^[17-19]; 沈昌蒲等认为

收稿日期: 2018-06-26, 修订日期: 2018-12-03

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2017YFC0504202); 国家自然科学基金项目(41801350; 41601458); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目。

作者简介: 贯丛, 女, 吉林长春人, 博士生, 研究方向为土地利用/覆被变化监测。E-mail: luccer@126.com

通讯作者: 张树文, E-mail: zhangshuwen@neigae.ac.cn

2019年2月

横坡垄与顺坡垄的水土流失都比较严重,只是侵蚀方式不同^[20];孟令钦认为水平垄具有汇流作用,能加速坡耕地的沟蚀,并提出了“沟渠效应”^[21];李飞等在吉林九台区发现斜坡垄最不容易产生侵蚀沟,而横坡垄最容易形成侵蚀沟^[22];宁静等在黑龙江宾县发现斜垄耕作更具水土保持作用^[23]。目前关于耕地垄向与沟蚀的关系研究多集中在土槽、坡面或小流域尺度^[19,22,23]。

由于缺少高精度的基础信息,例如在流域尺度上梯田、等高垄作等耕作措施的差异无法从传统土地利用图上获取^[24],更大空间尺度上的耕地垄向分布如何影响沟蚀发展目前仍不明确。2013年开始的全国第一次地理国情普查工作通过利用高分辨率遥感影像数据,对我国地理国情进行了全面展示^[25],为分析黑土区自然和人为因素与沟蚀变化关系提供了高精度的基础数据。

本文以吉林省九台区的三岔河流域为研究区,基于地理国情普查成果提供的高精度基础数据(包括Pleiades影像、DEM、地表覆被数据)获取耕地垄向和侵蚀沟数据,对沟蚀密度和裂度与耕地垄向角之间的关系进行定量分析,研究了不同垄向耕地中沟蚀与地形的耦合作用,并进一步揭示流域尺度上耕地垄向分布对沟蚀的影响机制,为黑土区采取更为合理有效的耕种措施提供科学依据。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

吉林省九台区位于东北典型黑土区的南部(图1),地理坐标为东经125°24'50"E—126°29'50"E,43°50'30"N—44°31'30"N,地形呈西南东北狭长形状,地势由西南向东倾斜,从冲积平原二级阶地(台地)过渡到低山丘陵(半山区)。全区河流水系发达,形成了广阔的冲积平原,而山岭均为长白山系哈达岭山脉的余脉,地表结构大体上是“三山、一水、六分田”。黑土类是九台区主要耕种土壤,包括黑土和草甸土两个亚类,分布最广、面积最大,质地较为粘重,多为壤土到粘壤土,机械组成以粗粉砂和粘粒为主,有机质含量相当丰富,土壤团粒结构较好。该地区四季分明,盛行西南风向,年平均气温和年降水量分别为5.3℃和568 mm,属于中温带大陆季风性气候。

图1 三岔河流域位置

Figure 1 Location of the Sancha River watershed

九台区内的三岔河中上游流域面积为157.88 km²,如图1所示,本研究选取该流域作为研究区,主要考虑到以下因素:①耕种土壤类型主要为黑土和草甸土,是东北典型黑土区的主要土壤类型;②地处长白山与松辽平原之间的丘陵地带,属于典型的漫川漫岗地形,地形起伏相对较大,是黑土区沟蚀高发区;③位于典型黑土区南部,开垦时间相对较早,垦殖率高,坡耕地是主要土地利用类型,耕地、林地和水域的面积分别占总面积的62.18%、30.07%和3.46%,其他土地覆被类型面积只有4.29%,而沟蚀多发生在坡耕地上;④该地区是东北黑土区水土流失较严重的地区之一,充沛的降水加上起伏的地形造成区内侵蚀沟分布广泛,因此,研究区对于揭示整个典型黑土区的侵蚀沟规律具有典型性和代表性。

2.2 数据来源及处理

本研究采用的高精度基础数据主要为吉林省第一次地理国情普查成果数据,包括高分辨率卫星遥感影像、数字地面模型(DEM)、地表覆被数据以及道路、水系、居民点等其他重要的地理国情数据,均由吉林省基础地理信息中心提供。高分辨率卫星影像采用Pleiades-1A影像(全色0.7 m,多光谱2.8 m,影像采集时间为2013/10/12),通过波段融合制作成0.7 m的正射影像。DEM是利用1:10 000比

例尺的地形图制作而成,栅格分辨率为5 m。地表覆盖数据是利用Pleiades-1A影像和0.5 m的航空影像采集并经过实地验证得到的,可从中提取出高精度的耕地空间分布数据。地形因子可利用DEM获取,其中DEM的值可以直接反映高程值,而坡度和坡向可利用ArcGIS 10的Spatial Analyst工具对DEM进行提取。

2.3 研究方法

(1) 耕地垄向参数提取及计算。本研究利用Pleiades影像对田块的垄向进行解译,在已有的地表覆盖数据中分割出垄向一致的旱地地块,将垄向赋予田块。利用DEM生成研究区的坡向栅格图层,然后利用ArcGIS的栅格计算器计算垄向与坡向之间的夹角。因为坡向和等高线之间互相垂直,所以可通过求余角的方式换算成垄向与等高线的夹角,即垄向角^[26]。

(2) 侵蚀沟数据提取及计算。本研究基于2013年Pleiades-1A影像,采用目视解译结合野外验证的方式对研究区耕地中的侵蚀沟(包括浅沟和切沟,如图2所示)进行提取,获得侵蚀沟在耕地中的矢量分布数据,包括线状和面状数据。本研究采用沟蚀密度和沟蚀裂度指标来评估沟蚀分布状况。沟蚀密度是指单位面积内的侵蚀沟总长度,采用ArcGIS的线密度工具进行密度插值;沟蚀裂度是指单位面积内的侵蚀沟总面积,采用ArcGIS的焦点统计工具来获取,具体做法可参照已有研究^[27]。沟蚀密度和沟蚀裂度是反映土地破碎程度和沟蚀剧烈程度的关键宏观指标。在沟蚀密度相同的情况下,沟蚀裂度越大,表示单位面积的侵蚀沟面积越大,往意

味着沟蚀中的侧蚀作用更为严重,导致两侧沟壁不断后退,面积增加^[27]。

(3) 不同垄向角对沟蚀分布的影响分析。为了量化分析耕地垄向角与侵蚀沟长度(沟蚀密度)和面积(沟蚀裂度)之间的关系,本研究将垄向角按照1°间隔进行细化分级后与沟蚀密度和裂度进行叠加统计分析。

(4) 不同垄向下沟蚀与地形的耦合作用分析。大量耕作侵蚀模型均表明,在特定土壤与耕作条件下,地形是影响耕作侵蚀的唯一因素^[28]。研究区内气候和土壤要素基本一致,故本文选择高程、坡度和坡向作为地形因子,对坡耕地的垄向与侵蚀沟的分布进行耦合分析。具体分析过程如下:研究区耕地主要分布在海拔200~360 m,故将DEM数据按照高程分为<200 m, 200~220 m, 220~240 m, 240~260 m, 260~280 m, 280~300 m, 300~320 m, 320~340 m, 340~360 m和>360 m共10个级别(按20 m间隔等分),获得高程因子图层;将坡度值按照1°间隔进行细化分级后获得坡度因子图层;对坡向值按照22.5°间隔进行分级,共分为N、NNE、NE、ENE、E、ESE、SE、SSE、S、SSW、SW、WSW、W、WNW、NW、NNW等16个级别,获得坡向因子图层。在此基础上,将沟蚀密度和裂度分别与高程、坡度、坡向图层进行叠加耦合,统计分析不同高程、坡度、坡向上耕地垄向对沟蚀密度和裂度的影响。

3 结果及分析

3.1 耕地垄向与侵蚀沟的空间分布特征

3.1.1 耕地垄向的分布特征

本文将垄向角分为0~10°, 10~20°, 20~30°, 30~

图2 三岔河流域坡耕地中的浅沟和切沟

Figure 2 The ephemeral gullies and small permanent gullies in the sloping cultivated lands in the Sancha River watershed

2019年2月

图3 三岔河流域坡耕地的垄向角分布

Figure 3 The distribution of ridge angles in the sloping cultivated lands in the Sancha River watershed

40°, 40~50°, 50~60°, 60~70°, 70~80°, 80~90°共9个级别进行统计(按10°间隔分隔)(图3)。由图3可以明显看出,随着垄向角的增大,坡耕地所占比例逐渐减小,由垄向角0~10°占坡耕地的19.5%,下降到垄向角80~90°占坡耕地的7.0%,减少了将近64.1%,这表明研究区横坡耕作的趋势非常明显,这与研究区早年采取“横山打垅”^[29]的措施有关。

3.1.2 侵蚀沟的空间分布特征

统计结果表明,研究区2013年的耕地面积为98.60 km²,而耕地中的侵蚀沟数量为1175条,总长度为151.51 km,总面积为417 000 m²,沟蚀密度为1.54 km/km²,沟蚀裂度为4230 m²/km²。依据水利部《黑土区水土流失综合防治技术标准》(SL446—2009)^[30],研究区的沟蚀强度为中度侵蚀。从沟蚀密度空间分布图(图4a)可以明显看出,流域内侵蚀沟分布广泛,均存在不同程度的沟蚀情况。但沟蚀密度和沟蚀裂度的分布特征存在较大的差异,这是由于不同类型侵蚀沟对两个指标计算的贡献程度不同,例如图2中两种类型侵蚀沟,相同的沟长对沟蚀密度指标计算的贡献是一样的,但面积更大的切沟对沟蚀裂度指标计算的贡献要比浅沟大很多。因此,流域东北部以宽、深的切沟为主,是侵蚀最为剧烈的地方(图4b)。

3.1.3 解译精度评估

本研究采用野外验证的方式对提取的耕地垄向和侵蚀沟精度进行评估。对于耕地垄向,选取两

图4 三岔河流域沟蚀密度和裂度空间分布

Figure 4 The distribution of gully density and intensity in the Sancha River watershed

个1 km²的小流域,利用GPS和罗盘对流域内耕地的垄向与解译结果进行对比验证,结果表明平均方向角度偏差为7°;对于侵蚀沟,野外随机选择20条侵蚀沟进行验证,结果表明共有18条侵蚀沟被准确判别,目视解译的整体精度达到了90%,并根据验证结果对解译数据进行了修正。

3.2 耕地垄向与侵蚀沟空间分布的耦合分析

3.2.1 不同垄向角对沟蚀分布的影响

研究结果表明,随着垄向角的增大,沟蚀密度和沟蚀裂度均呈线性下降趋势,即坡耕地的垄向角愈小,沟蚀愈强烈(图5)。其中,垄向角与平均沟蚀

图5 三岔河流域垄向角与沟蚀密度和裂度的拟合曲线

Figure 5 The fitting curve of ridge angle with gully density and intensity in the Sancha River watershed

密度的线性拟合效果最好,拟合方程为 $y=1.83-0.01x$,决定系数 $R^2=0.95$ 。而垄向角与平均沟蚀裂度的线性拟合方程为 $y=8078.16-25.19x$,决定系数 $R^2=0.77$,拟合效果相对稍差。以上统计结果,均通过了0.05显著性水平检验。但该结果并不能直接表征垄向角与坡面侵蚀量(水土流失量)之间的相关程度。

为了方便与已有研究进行对比,本文将垄向角按照横坡垄($0\sim10^\circ$)、斜坡垄($10\sim80^\circ$)及顺坡垄($80\sim90^\circ$)进一步统计分析。结果表明,研究区横坡垄中的侵蚀沟密度和裂度都是最大的,从横坡垄的平均沟蚀密度 1.76 km/km^2 和平均沟蚀裂度 $7628\text{ m}^2/\text{km}^2$ 分别减少到顺坡垄的 1.06 km/km^2 和 $5982\text{ m}^2/\text{km}^2$,下降幅度达到40%和22%。斜坡垄整体的平均沟蚀密度和沟蚀裂度为 1.43 km/km^2 和 $7119\text{ m}^2/\text{km}^2$,均介于横坡垄和顺坡垄之间(图6)。这是由于:虽然顺坡垄作增加了坡面径流量和侵蚀量^[17],但严重侵蚀部位主要发生在顺坡垄的坡脚处,并不破坏垄台^[20],坡面侵蚀方式以细沟侵蚀为主^[17],所以顺坡垄的沟蚀(浅沟和切沟)密度和裂度最小;而虽然横坡垄作在断垄前具有较好的防蚀效应,但由于研究区属于漫川漫岗地形,地势波状起伏,微地貌的存在会使得垄向偏离等高线,横坡垄并不是真正的等高垄,每条横垄沟中高低不平,再加上东北黑土区机械犁耕下垄丘的土壤稳定性相对较差^[18],在短历时暴雨的情况下,横坡垄的坡耕地中产生的超渗径流会沿垄沟汇集,在脆弱的垄段和不水平的低洼处冲开垄体造成断垄,形成集中股流,其产生的巨大径流剪

切力超过了土壤的抗蚀性从而造成沟蚀,即沟渠效应^[21]。横坡垄出现断垄主要受到降雨强度、雨型、坡度以及垄丘稳定性等因素的影响^[18]。Xu等在黑土区进行的模拟降雨试验表明,横坡垄作在 $\leq 50\text{ mm/h}$ 的降雨强度下能够有效防蚀,但遇到强降雨容易发生断垄^[19]。根据长春地区历史资料统计(1953—2012年),7—8月的累积降雨量占年降雨量的61.5%,短历时(60 min)年最大降雨量可达 $5\sim72\text{ mm}$ ^[31]。试验数据表明,在 75 mm/h 的降雨强度下,横坡垄作断垄后的径流强度最大峰值超过 200 mm/h ,而顺坡垄作稳定阶段的径流强度为 60 mm/h ^[19]。短历时高强度的暴雨导致横坡垄断垄后的汇流作用所形成的集中股流远远超过了顺坡垄,所以研究区横坡垄的沟蚀反而最为强烈。

3.2.2 不同高程上耕地垄向对沟蚀分布的影响

整体上看(图7),各耕地垄向中的沟蚀密度和裂度随高程的增加呈现先增加后减少的趋势。对于沟蚀密度,不论高程如何均呈现出横坡垄>斜坡垄>顺坡垄,其中280 m以下各垄向耕地的沟蚀密度变化不大,当高程大于280 m时各垄向耕地的沟蚀密度突然开始增加,在320~340 m达到最大值。对于沟蚀裂度,280 m以下各垄向耕地的沟蚀裂度之间差距不明显,均呈现先增加后减少的趋势。但当高程大于280 m时,各垄向耕地的沟蚀裂度变化趋势出现转折,横坡垄的沟蚀裂度开始波动增加,而斜坡垄和顺坡垄的沟蚀裂度逐渐增加,在300~320 m处达到峰值,其中斜坡垄的沟蚀裂度最大。综上,当海拔小于280 m时,各垄向耕地的沟蚀裂度(沟面积)差异不大,而沟蚀密度(沟长)之间存在较大差异,所以不同垄向耕作对沟蚀的影响主要体现在沟长;当海拔大于280 m时,不同垄向耕地中的沟蚀密度和裂度都开始突然增加,这是由于随着海拔升高,耕地的平均坡度开始增加(表1),耕地在280~300 m的平均坡度就达到了 7.5° ,土壤颗粒的剪切力增加^[32],土壤侵蚀强度加大,同时,沟头的溯源侵蚀作用更加明显,所以各垄向耕作均不能有效地抵御侵蚀沟的产生,应实行退耕还林还草,加强沟蚀防治。

3.2.3 不同坡度上耕地垄向对沟蚀分布的影响

由于研究区 25° 以上的耕地面积数量比较少(仅占总面积的0.14%),而且非常不适宜耕种,故此

图6 三岔河流域不同垄向耕地的沟蚀密度和裂度分布

Figure 6 The distribution of gully density and intensity in cultivated land with different ridge directions in the Sancha River watershed

图7 三岔河流域不同垄向耕地沟蚀密度和裂度的高程分异特征

Figure 7 Elevation differentiation of gully density and intensity in cultivated land with different ridge directions in the Sancha River watershed

表1 三岔河流域不同高程级别耕地的平均坡度

Table 1 Average slope of cultivated land at different elevation levels in the Sancha River watershed

海拔/m	<200	200~220	220~240	240~260	260~280	280~300	300~320	320~340	340~360	> 360
平均坡度/°	1.0	3.3	4.7	5.5	6.4	7.5	8.5	9.9	10.3	9.7

处不做讨论。通过地面坡度与沟蚀密度和沟蚀裂度的耦合分析可知,各耕地垄向中的沟蚀密度和沟蚀裂度整体呈现先增大后减小的趋势(图8)。这是由于随着坡度的增大,土壤颗粒的剪切力也随之增加^[32],土壤稳定性降低,由重力引起的土壤侵蚀会增多,土壤侵蚀强度相应增加。但随着坡度的进一步加大,林地所占的比例也越来越大,在10~15°时会超过50%(图9)。林地能够对降雨有效截流,减少水土流失,再加上上游的汇水面积减少,黑土较好的渗水性和透水性,侵蚀沟的发育受到限制^[33]。对于沟蚀密度,当坡度小于12°时,横坡垄>斜坡垄>顺坡垄,这是由于“沟渠效应”的存在,使得横坡垄作在短历时暴雨的情况下断垄后形成的集中股流远远超过了顺坡垄,所以横坡垄中的沟蚀密度最大,顺坡垄最小;当坡度大于12°时,各垄向耕地的侵蚀沟密度无明显差别。对于沟蚀裂度,当坡度小于15°

时,各垄向耕地的沟蚀裂度差别不大,其中顺坡垄略小;当坡度大于15°且小于23°时,顺坡垄>斜坡垄>横坡垄,这可能是由于当坡度过大时,上游的汇水少,横坡垄能够阻挡降雨汇水向下流动,减缓汇流对土壤的侵蚀,而顺坡垄和斜坡垄则作用相反。但由于坡度增加导致土壤稳定性降低,重力引发的沟壁坍塌等现象增多,所以横坡垄中的沟蚀裂度仍然要高于缓坡(<5°)各垄向耕地的沟蚀裂度。因此,应停止陡坡地的开垦,减少沟蚀的产生。

3.2.4 不同坡向上耕地垄向对沟蚀分布的影响

坡向图与沟蚀密度和裂度的叠加分析结果表明(图10,见401页),各耕地垄向中的沟蚀在不同的坡向存在差异性,整体上看,西南坡的沟蚀最为严重,特别是西南坡的沟蚀裂度明显大于其他坡向。这是由于研究区盛行西南风向,迎风坡的降雨侵蚀力要明显大于背风坡,同时阳坡受到更多的太阳辐

图8 三岔河流域不同垄向耕地沟蚀密度和裂度的坡度分异特征

Figure 8 Slope gradient differentiation of gully density and intensity in cultivated land with different ridge directions in the Sancha River watershed

图9 三岔河流域各坡度等级上的土地利用类型统计

Figure 9 Statistics of land use types in different slope grades in the Sancha River watershed

射,土壤昼夜温差要比阴坡大,冻融作用强,加上春季积雪融化较快造成水流相对集中,因而土壤侵蚀更为严重^[34]。对于沟蚀密度,整体上呈现横坡垄>斜坡垄>顺坡垄;而对于沟蚀裂度,在阴坡各耕地垄向之间的差异不大,但在阳坡,除了部分坡向(WSW、SW)斜坡垄的沟蚀裂度高于横坡垄之外,其他坡向

均表现出横坡垄>斜坡垄>顺坡垄。这也表明,各耕作垄向在阴坡对沟蚀面积的影响无明显差异。

3.3 讨论

(1)通常认为,垄向能够降低径流流速,减小水流对土壤的分散作用和挟沙能力^[16],而横坡垄作能够阻挡降雨汇水向下流动,在断垄前可以将坡面径流量和侵蚀量分别减少97.7%和99.1%以上^[18],具有水土保持作用,一定程度上减少侵蚀沟的产生。但本研究结果表明,横坡垄作的侵蚀沟密度和裂度整体上反而最大。宁静等在与研究区气候地形条件相似的黑龙江省三宝乡也得出了同样的结论^[23]。模拟降雨试验表明黑土区横坡垄遇到强降雨时易发生断垄,防蚀效应急剧降低^[19]。研究区雨季短历时、高强度的暴雨加剧了横坡垄耕地中的沟蚀,单一的水平改垄措施反而使得坡耕地的沟蚀进一步加快。

(2)相比以往的研究,本文采用了精度更高的地表覆被数据、分辨率更高的遥感影像和DEM数据对流域尺度上耕地垄向与侵蚀沟长度及面积的耦合关系进行了定量化分析,获得了耕地垄向角与侵蚀沟密度和裂度的线性拟合方程。但受到遥感影像分辨率的限制,本研究无法识别出耕地中的细

图10 三岔河流域不同垄向耕地沟蚀密度和裂度的坡向分异特征

Figure 10 Slope aspect differentiation of gully density and intensity in cultivated land with different ridge directions in the Sancha River watershed

沟以及部分浅沟,未能将这部分侵蚀考虑在内。

(3)虽然本研究表明横坡垄中的沟蚀密度和裂度都要比顺坡垄大,但由于缺少侵蚀量的分析,该结果并不意味着横坡垄中的水土流失要比顺坡垄严重。大部分学者通过试验表明横坡垄减少水土流失的效果要优于顺坡垄^[35,36],而沈昌蒲等^[20]通过调查发现缓坡坡耕地中横坡垄和顺坡垄的水土流失都比较严重,只是侵蚀方式有差异。特别是从发展的角度看,横坡垄的断垄处很可能就会发展成又宽又深的洼沟,洼沟左右两侧的土地会逐渐向洼沟倾斜,耕地的坡度越来越大,又成为顺坡垄^[20]。因此,未来对于区域或流域尺度上侵蚀沟体积即沟蚀量与耕地垄向之间的定量关系仍需进一步探讨,而利用三维激光扫描仪、无人机遥感、基于照片的三维重建方法等三维监测技术逐步替代传统二维监测技术对侵蚀沟体积进行监测将是沟蚀监测领域的一个重要发展趋势^[37-40]。

4 结论

本文以东北典型黑土区的三岔河流域为研究区,基于地理国情普查提供的高精度基础数据获取耕地垄向和侵蚀沟数据,对沟蚀密度和裂度与耕地垄向角之间的关系进行定量分析,并研究了不同垄向下沟蚀与地形的耦合作用,得到以下结论:

(1)研究区横坡耕作的趋势非常明显,耕地中

的侵蚀沟数量为1175条,总长度为151.51 km,总面积为417 000 m²,沟蚀密度为1.54 km/km²,沟蚀裂度为4230 m²/km²,沟蚀强度为中度侵蚀。

(2)定量分析结果表明,耕地垄向角与沟蚀密度和裂度显著负相关,即随着垄向角的增大,研究区耕地的平均沟蚀密度和裂度呈线性下降趋势。垄向角和沟蚀密度的线性拟合效果最好($R^2=0.95$, $P<0.05$),沟蚀裂度稍差($R^2=0.77$, $P<0.05$)。横坡垄中的侵蚀沟密度和裂度最大。

(3)不同垄向中的侵蚀沟分布具有明显的地形分异特征。当海拔小于280 m时,各垄向耕地的沟蚀裂度(沟面积)之间差异不大,而沟蚀密度(沟长)之间存在较大差异,所以不同垄向耕作对沟蚀的影响主要体现在沟长;当海拔大于280 m时,不同垄向耕地中的沟蚀密度和裂度都开始突然增加,各垄向耕作均不能有效地抵御侵蚀沟的产生,所以海拔超过280 m的地区不宜耕种,应实行退耕还林还草,加强沟蚀防治。对于不同的坡度,坡度小于12°时,“沟渠效应”的作用使得横坡垄中的沟蚀密度最大,顺坡垄最小,因此研究区单一的水平改垄措施并不能有效地防止侵蚀,应配合其他治理措施来防治侵蚀沟;当坡度大于15°时,横坡垄中的沟蚀裂度最小,但仍高于缓坡各垄向耕地的沟蚀裂度,应停止陡坡地的开垦,减少沟蚀的产生;其他坡度则无明

显差异。对于不同的坡向,各耕作垄向在阴坡对侵蚀沟面积的影响无明显差异。

参考文献(References):

- [1] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8. [Liu B Y, Yan B X, Shen B, *et al.* Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 1-8.]
- [2] 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. 中国水土保持, 2008, (12): 26-30. [Yan B X, Yang Y H, Liu X T, *et al.* Status and trends of soil erosion in Northeast China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008, (12): 26-30.]
- [3] 范昊明, 顾广贺, 王岩松, 等. 东北黑土区侵蚀沟发育与环境特征[J]. 中国水土保持, 2013, (10): 75-78. [Fan H M, Gu G H, Wang Y S, *et al.* Characteristics of eroded gully development and environment of black soil region in Northeast China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013, (10): 75-78.]
- [4] Daba S, Rieger W, Strauss P. Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques[J]. *Catena*, 2003, 50(2): 273-291.
- [5] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, *et al.* Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. *Catena*, 2003, 50(2): 91-133.
- [6] 闫业超, 张树文, 岳书平. 基于 Corona 和 Spot 影像的近 40 年黑土典型区侵蚀沟动态变化[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 154-160. [Yan Y C, Zhang S W, Yue S P. Application of corona and spot imagery on erosion gully research in typical black soil regions of Northeast China[J]. *Resources Science*, 2006, 28(6): 154-160.]
- [7] Wang R, Zhang S, Pu L, *et al.* Gully erosion mapping and monitoring at multiple scales based on multi-source remote sensing data of the Sancha River Catchment, Northeast China[J]. *International Journal of Geo-information*, 2016, DOI: 10.3390/ijgi5110200.
- [8] 游智敏, 伍永秋, 刘宝元. 利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 91-94. [You Z M, Wu Y Q, Liu B Y. Study of monitoring gully erosion using GPS[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(5): 91-94.]
- [9] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 449-454. [Hu G, Wu Y Q, Liu B Y, *et al.* Geomorphic threshold model for ephemeral gully incision in rolling hills with black soil in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sincia*, 2006, 26(4): 449-454.]
- [10] Yang J, Zhang S, Chang L, *et al.* Gully erosion regionalization of black soil area in Northeastern China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(1): 78-87.
- [11] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文. 东北典型黑土区 40 年来沟蚀空间格局变化及地形分异规律[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 68-71. [Wang W J, Deng R X, Zhang S W. Spatial pattern change and topographic differentiation of gully erosion in the type black soil area of northeast China during the past 40 years[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(3): 68-71.]
- [12] 李飞, 张树文, 李天奇. 东北典型黑土区南部侵蚀沟与地形要素之间的空间分布关系[J]. 土壤与作物, 2012, 1(3): 148-154. [Li F, Zhang S W, Li T Q. The spatial distribution relations between erosion gully and terrain factors in the south of typical black soil zone in Northeast China[J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(3): 148-154.]
- [13] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文. 东北典型黑土区讷漠尔河流域土地利用变化对沟蚀影响研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 833-844. [Wang W J, Deng R X, Zhang S W. Effect of land use change on gully erosion in Nemoer river basin of typical black soil region of Northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 833-844.]
- [14] 李浩, 张兴义, 刘爽, 等. 典型黑土区村级尺度侵蚀沟演变[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 21-28. [Li H, Zhang X Y, Liu S, *et al.* Evolution of gully erosion in village scale in the typical black soil area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(2): 21-28.]
- [15] Álvarez-mozos J, Campo MÁ, Giménez R, *et al.* Implications of scale, slope, tillage operation and direction in the estimation of surface depression storage[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 111(2): 142-153.
- [16] Takken I, Jetten V, Govers G, *et al.* The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns[J]. *Geomorphology*, 2001, 37(1): 1-14.
- [17] 边锋, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 11-16. [Bian F, Zheng F L, Xu X M, *et al.* Comparison of soil erosion process between longitudinal ridge slope and non-ridge slope in Mollisol Region of Northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1): 11-16.]
- [18] 王磊, 何超, 郑粉莉, 等. 黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 141-148. [Wang L, He C, Zheng F L, *et al.* Soil-bin experiment on effects of contour ridge tillage for controlling hillslope soil erosion in black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 141-148.]
- [19] Xu X M, Zheng F L, Wilson G V, *et al.* Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 177: 1-11.
- [20] 沈昌蒲, 龚振平, 温锦涛. 横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研

2019年2月

- 究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 48-49. [Shen C P, Gong Z P, Wen J T. Comparison study on soil and water loss of cross ridge and longitudinal ridge[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(4): 48-49.]
- [21] 孟令钦. 东北黑土区沟蚀机理及防治模式的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009. [Meng L Q. Study on Dynamics of Gully Erosion and Its Controlling in the Black Soil Region, Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.]
- [22] 李飞, 张树文, 杨久春, 等. 侵蚀沟与耕地垄向之关系探究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 1-4. [Li F, Zhang S W, Yang J C, et al. Investigation of relations between gully and ridge direction [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 1-4.]
- [23] 宁静, 杨子, 姜涛, 等. 东北黑土区不同垄向耕地沟蚀与地形耦合规律[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 29-36. [Ning J, Yang Z, Jiang T, et al. The coupling laws between gully erosion of cultivated lands with different ridge directions and terrain in Northeast Black Soil Region of China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 29-36.]
- [24] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(1): 73-85.
- [25] Zhang J, Li W, Zhai L. Understanding geographical conditions monitoring: A perspective from China[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2015, 8(1): 38-57.
- [26] 赵玉明, 刘宝元, 姜洪涛. 东北黑土区垄向的分布及其对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 1-6. [Zhao Y M, Liu B Y, Jiang H T. Distribution of tillage-induced direction and its effect on soil erosion in Black Soil Area of Northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(5): 1-6.]
- [27] 王让虎. 基于多源多尺度数据的东北典型黑土区侵蚀沟遥感监测体系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. [Wang R H. Gully Erosion Monitoring at Multiple Scales Based on Multi-Source Remote Sensing Data of the Typical Black Soil Area, Northeast China[D]. Changchun: Jilin University, 2017.]
- [28] 王占礼. 黄土坡地耕作侵蚀及其效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002. [Wang Z L. Study of Tillage Erosion and Its Effects on Loess Sloping Land[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2002.]
- [29] 九台市土地管理局. 九台市土地志[M]. 吉林: 九台市土地管理局, 1998. [Bureau of Land Management of Jiutai. Jiutai Land History[M]. Jilin: Bureau of Land Management of Jiutai, 1998.]
- [30] 中华人民共和国水利部. 黑土区水土流失综合防治技术标准(SL446-2009)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. [Ministry of Water Resources of the PRC. Techniques Standard for Comprehensive Control of Soil Erosion in the Black Soil Region(SL446-2009)[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.]
- [31] 李晶, 刘志生, 薛喜权, 等. 长春市降雨特征及雨型分析研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(5): 100-104. [Li J, Liu Z S, Xue X Q, et al. Study of rainfall characteristics and pattern in Changchun City [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(5): 100-104.]
- [32] Ranzi R, Le T H, Rulli M C. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the lo river (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 422(5): 17-29.
- [33] 李天奇. 东北黑土区侵蚀沟成因与模型研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2012. [Li T Q. A Cause Study and Module Simulation of Gully Erosion in Black Soil Region[D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology), 2012.]
- [34] 闫业超, 张树文, 李晓燕, 等. 黑龙江克拜黑土区 50 多年来侵蚀沟时空变化[J]. 地理学报, 2005, 60(6): 1015-1020. [Yan Y C, Zhang S W, Li X Y, et al. Temporal and spatial variation of erosion gullies in Kebai black soil region of Heilongjiang during the past 50 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(6): 1015-1020.]
- [35] 张晶玲, 周丽丽, 马仁明, 等. 天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 114-119. [Zhang J L, Zhou L L, Ma R M, et al. Runoff and sediment yield process on longitudinal and cross ridge slopes under natural rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 114-119.]
- [36] 宋玥, 张忠学. 不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 14-16. [Song Y, Zhang Z X. The effect of different tillage measures on soil erosion in slope farmland in black soil region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(2): 14-16.]
- [37] Peter K D, D'Oleire-Oltmanns S, Ries J B, et al. Soil erosion in gully catchments affected by land-leveilling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data[J]. *Catena*, 2014, 113(2): 24-40.
- [38] Stöcker C, Eltner A, Karrasch P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: A case study from Andalusia, Spain[J]. *Catena*, 2015, 132: 1-11.
- [39] Kaiser A, Neugirg F, Rock G, et al. Small-scale surface reconstruction and volume calculation, of soil erosion in complex Moroccan gully morphology using structure from motion[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7050-7080.
- [40] Gudino-Elizondo N, Biggs T, Castillo C, et al. Measuring ephemeral gully erosion rates and topographical thresholds in an urban watershed using unmanned aerial systems and structure from motion photogrammetric techniques[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(6): 1896-1905.

Coupling analysis between ridge direction and gully erosion of sloping cultivated lands in the Sancha River watershed

GUAN Cong^{1,2,3}, ZHANG Shuwen², WANG Ranghu⁴, YANG Jiuchun²,

YUE Shuping⁵, YU Lingxue², WANG Wenjuan⁶

(1. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;

3. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

4. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

5. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

6. College of Resources and Environmental Sciences, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The initiation and development of gully erosion in the sloping farmland of black soil area are closely related to the tillage measures. Taking the Sancha River watershed in typical black soil area of Northeast China as the study area, this study used the high precision basic data provided by the geographical conditions information census to obtain the ridge direction of cultivated land and gully erosion data. The relationship between the gully density and intensity and the ridge direction angle in the cultivated land was quantitatively analyzed. Then we studied the coupling effect of the gully erosion in different ridge directions and topography. The results showed that: (1) There was an obvious trend of horizontal ridge tillage of sloping farmland; (2) The gully intensity of cultivated land was moderate in the study area; (3) The ridge angle of cultivated land was significantly negatively correlated with the gully erosion density and intensity. With the increase of the angle between contour line and ridge direction, the average gully density and intensity in sloping farmlands gradually decreased. The gully density and intensity in the horizontal ridge tillage were the largest. The linear fitting effect of ridge angle and gully density was the best, and the gully intensity was slightly worse; (4) The distribution of gullies in different ridge directions has obvious topographic differentiation characteristics. In the cultivated land where the elevation was more than 280 m, all ridge tillage cannot effectively resist the gully erosion; when slope gradient was greater than 15°, the gully intensity of cultivated land with contour ridge was the least, however, it was still higher than the gully intensity of cultivated land with every ridges on gentle slope; there was no significant difference in the effect of ridge directions on the area of the gullies on the shady slope.

Key words: geographical conditions information census; sloping cultivated lands; ridge direction; erosion gully; coupling analysis; typical black soil area in Northeast China; Sancha River watershed