

黑土耕作区侵蚀沟治理紧迫度空间分布特征

李全峰^{1,2}, 李吉程¹, 于明鹏^{3*}, 郭欣欣¹

(1. 东北农业大学公共管理与法学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省土地遥感大数据技术创新中心, 哈尔滨 150030;
3. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要:综合把握侵蚀沟发育状态及其治理紧迫程度可为有效判断区域侵蚀沟防控方向与治理重点提供重要参考。论文结合侵蚀沟形态数据,构建区域侵蚀沟治理紧迫度评价指标体系,从乡镇与网格尺度揭示区域侵蚀沟侵蚀程度及其空间分布规律。结果表明:①从数量特征看,海伦黑土耕作区侵蚀沟分布呈非均衡状态,沟道长度以微/小型(≤ 500 m)为主,沟道面积以一/二级(≤ 0.8 hm²)为主。②从空间规律看,网格尺度侵蚀沟密度等级呈现由西南向东北逐步增加趋势,而侵蚀沟密度等级以轻度侵蚀(≤ 2 km/km²)为主且在县域内无明显空间差异;乡镇尺度侵蚀沟密度以轻度侵蚀(≤ 2 km/km²)为主,主要分布在海伦西部,而侵蚀沟裂度以中/强度侵蚀(0.10%~0.35%)为主,主要分布在海伦西北与东南部。③从治理紧迫度看,2017年海伦黑土耕作区侵蚀沟以低紧迫治理(0.03~0.26)状态为主,主要分布在海伦低山低丘地区,位于海伦中西部乡镇;而紧迫/极紧迫治理紧迫度主要分布于低山/漫川漫岗区,位于海伦东北部。在未来区域侵蚀沟防治监测监管中,县级部门可依据乡镇侵蚀沟治理紧迫度优先防治侵蚀严重区域,而乡镇部门可依据网格尺度侵蚀沟治理紧迫度进行实地察看与重点监测。

关键词:侵蚀沟;分布特征;监测监管;治理紧迫度;耕地;东北黑土区

受自然资源禀赋与人类掠夺式种植影响,东北黑土区大面积坡耕地水土流失严重,侵蚀沟发育速度日益加剧^[1-2]。在耕地保护严控期,东北黑土区作为全国重要商品粮基地和农业生态安全保障区,全面防治侵蚀沟发育成为保障区域粮食安全的重要前提^[3-4]。中共中央、国务院、水利部、中国科学院等部门先后启动《东北黑土区侵蚀沟治理专项规划(2016—2030年)》和《东北黑土区侵蚀沟生态修复关键技术研发与集成示范》等一系列综合防治工程和技术攻关项目,为新时期东北黑土区侵蚀沟防治提

供了顶层指导^[5-9],也标志着侵蚀沟防治技术研究进入规范引领阶段。

在侵蚀沟治理技术日渐成熟阶段,准确监测与评估区域沟道侵蚀程度是有效防治侵蚀沟发育的前提,更是实现侵蚀沟治理工作从单条侵蚀沟防治到区域大面积综合整治转变的重要基础。通常情况下,区域侵蚀沟形态包含长度、宽度、面积等要素^[10-11],其常见提取方法为遥感解译判读法^[12],通过目视解译、像元分析、对象分析等方法实现^[13-15]。值得注意的是,遥感解译判读法提取侵蚀沟形态的准

收稿日期:2020-04-13;修订日期:2021-05-02。

基金项目:国家自然科学基金项目(41901208);黑龙江省哲学社会科学基金项目(19GLH017);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2020117);东北农业大学东农学者计划项目(18QC10);黑龙江省自然科学基金项目(LH2019D003)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41901208; Philosophy and Social Science Foundation of Heilongjiang Province, No. 19GLH017; Youth Innovative Talents Training Program of Regular Higher Education Institutions of Heilongjiang Province, No. UNPYSCT-2020117; Scholar Project of Northeast Agricultural University, No. 18QC10; Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, No. LH2019D003.]

第一作者简介:李全峰(1987—),男,黑龙江佳木斯人,讲师,硕士生导师,主要从事耕地利用与保护研究。

E-mail: quanfeng.li@neau.edu.cn

***通信作者简介:**于明鹏(1996—),男,黑龙江双鸭山人,硕士生,主要从事耕地利用与生态保护研究。

E-mail: yump123456@gmail.com

引用格式:李全峰,李吉程,于明鹏,等.黑土耕作区侵蚀沟治理紧迫度空间分布特征[J].地理科学进展,2021,40(7):1208-1219.[Li Quan-feng, Li Jicheng, Yu Mingpeng, et al. Spatial pattern of gully erosion control urgency in black soil farming area. Progress in Geography, 2021, 40(7): 1208-1219.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.07.011

确性依赖于遥感影像分辨率大小。对比不同分辨率解译效果发现,资源三号与高分一号遥感影像更适用于提取区域侵蚀沟形态^[13]。基于提取的侵蚀沟形态数据,学者们通过构建沟道密度/裂度等指标评估区域沟道侵蚀强烈程度^[16-19]。在实际治理过程中,县级主管部门负责监测/防治工作,而乡镇主管人员负责察看/上报工作^[7,20-21]。结合现有研究成果与实际监管工作,当前侵蚀沟治理紧迫程度往往以单一要素指标为主进行评估,基于多要素综合评估的相关研究尚不多见。由于区域侵蚀沟发育状态及其治理紧迫程度缺少综合性把握,致使县/乡两级主管部门监测/预警工作成效有待于进一步提升,直接影响未来侵蚀沟防治工作。因此,如何构建侵蚀沟治理紧迫程度评估指标体系对有效判断区域侵蚀沟治理优先级,以及为系统监测平台与监管人员提供理论依据至关重要。

鉴于此,本文选取海伦市作为典型东北黑土研究区,构建东北黑土区侵蚀沟治理紧迫度指标体系,借用综合评价法与空间特征分析法,从网格与乡镇尺度系统刻画县域侵蚀沟侵蚀强烈程度空间格局,以期为深入探讨东北黑土耕作区水土流失防治模式提供必要支撑。

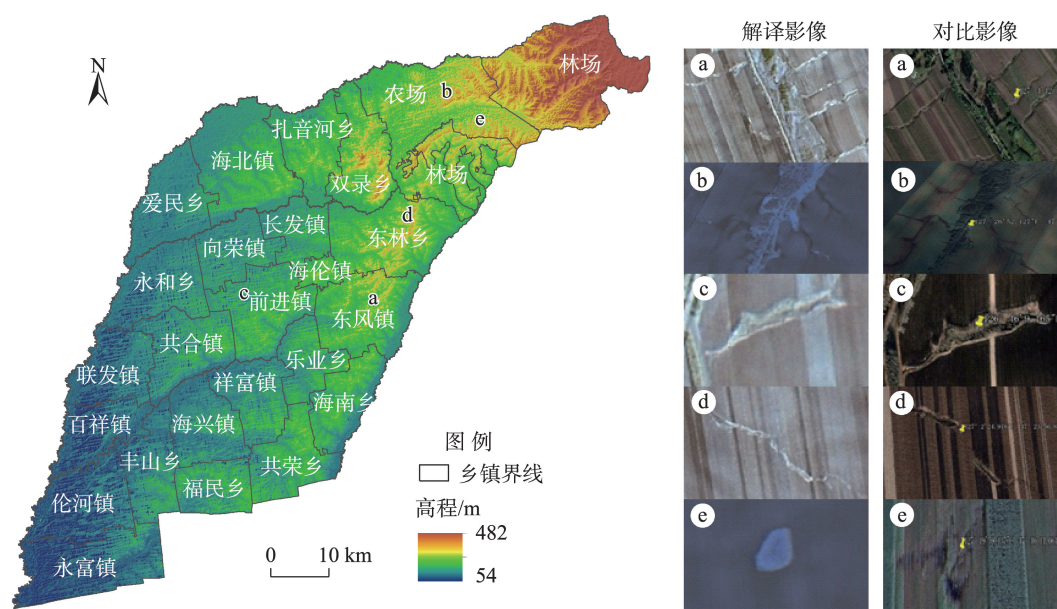
1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

海伦市位于黑龙江省中部黑土核心地区,介于 $126^{\circ}14'E\sim 127^{\circ}45'E$ 与 $46^{\circ}58'N\sim 47^{\circ}52'N$ 之间,地处小兴安岭余脉向松嫩平原过渡带,下辖13个镇、10个乡、1个国有林场与1个国有农场(图1)。海伦土地总面积为 4642.82 km^2 ,其中耕地面积为 3531.32 km^2 ,主要种植旱田作物。在自然地理特征方面,海伦市位于半干旱半湿润区,属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,且降雨主要集中在5—9月,具有历时短、强度大与分配不均的特点,年均降水量 550 mm 。海伦市高程介于 $54\sim 482\text{ m}$ 之间,地势自东北向西南逐步降低,依次形成“低山缓丘漫岗平川”的地形特征。受漫丘漫岗地形与夏季集中强降水的双重作用,海伦黑土耕作区容易形成大量的地表径流,造成土壤侵蚀现象。

1.2 数据来源

本文涉及的侵蚀沟空间信息与耕地利用数据分别由高分影像和Landsat 8影像解译而来。其中,侵蚀沟空间信息数据来源于资源卫星影像(2.1 m)与高分一号影像(2.1 m),成像时间分别为2017年4月22日和2017年5月22日,并将资源卫星的全色



注:图中解译影像为资源卫星的全色影像(2.1 m)与多光谱影像(6 m)和高分卫星的全色影像(2.1 m)与多光谱影像(5.8 m)融合为空间分辨率 2 m 的海伦遥感影像,对比影像为Google地球遥感影像(1.8 m)。

图1 海伦市自然地理区位和解译标志

Fig.1 Location of Hailun City and interpretation symbols

影像(2.1 m)与多光谱影像(6 m)和高分卫星的全色影像(2.1 m)与多光谱影像(5.8 m)融合为空间分辨率2 m的海伦遥感影像。在耕地利用数据提取方面,由于耕地光谱和纹理特征明显,且其图斑通常较大;而Landsat 8影像(15 m)能够满足研究的精度要求,因此为了提高解译效率,本文的耕地信息由Landsat 8影像(15 m)解译而来,而未采用高分辨率影像。其中影像的成像时间为2017年9月25日,条带号为118、行编号为27且云量为0。此外,海伦市乡镇行政区划数据来源于黑龙江省1:10万县级行政区划图。该行政区划图参照相关地理图件与野外实测资料,基于ArcGIS平台的人机交互方式,开展行政区划界线的矢量化工作,最终获取2017年海伦市乡镇行政区划数据。

2 研究方法与数据处理

2.1 侵蚀沟分类定级

侵蚀沟的发育通常会经历出现、发展、过渡、形成和消失等阶段,根据不同阶段侵蚀沟的长度、宽度和深度等特征可以将其划分为细沟、浅沟、切沟、冲沟和河沟等不同类型^[22-23]。细沟是侵蚀沟发育的早期形态,在空间上呈多股侵蚀沟交错的特征,能通过耕作消除^[11]。细沟进一步发育会形成浅沟,其宽度多在0.5~1 m之间^[24]。由浅沟发育至切沟标志着侵蚀沟的初步形成,此阶段侵蚀沟的沟槽深度多在1~3 m^[24]。随着土壤侵蚀的进一步发展,切沟会进一步发育成沟槽深度介于3~6 m的冲沟,这也标志着侵蚀沟的正式形成^[25]。此后,侵蚀沟会逐步进入消失期,沟坡逐渐平缓,形成宽而浅的河沟。

本文参考前人关于沟道侵蚀分类研究成果^[11,22-26],结合东北黑土区地形特征与海伦市侵蚀沟的实际发育特点,将沟道宽度为0.5~1.0 m的沟道划分为浅沟,1.0~3.0 m的沟道划分为切沟,3.0~6.0 m的沟道划分为冲沟,以此为沟道分类标准进行侵蚀沟空间信息提取。进一步依据《土壤侵蚀分类分级标

准》与《黑土区水土流失综合防治技术标准》^[27-28],将侵蚀沟按照长度分为微型、小型、中型、大型和巨型沟5类。其中,微型沟的沟道长度 ≤ 200 m,小型沟长度在200~500 m之间,中型沟长度介于500~1000 m,1000~2500 m和大于2500 m的分别为大型沟和巨型沟。在此基础上,根据不同类型侵蚀沟沟道面积的差异,将侵蚀沟细分为5级:一级沟的沟道面积 ≤ 0.2 hm²,二级沟的沟道面积在0.2~0.8 hm²之间,三级沟的沟道面积介于0.8~1.4 hm²,1.4~2.0 hm²和大于2.0 hm²的分别为四级和五级沟。

2.2 侵蚀沟空间信息提取

为了准确提取研究区内不同形态侵蚀沟,本文对资源三号卫星与高分一号卫星的全色与多光谱影像进行正射校正与图像融合等预处理工作。首先,基于影像有理函数纠正函数(RPC文件),借用Envi平台的Geometric Correction功能对2幅影像分别进行空间校正和投影差改正,将影像重采样成无偏移的正射影像。然后,应用Gram-Schmidt Spectral Sharpening功能进行全色与多光谱影像融合,形成投影坐标系为西安1980且空间分辨率为2 m的海伦市高清遥感影像。最后,根据研究区影像光谱特征与侵蚀沟的纹理/颜色特征^[29],创建海伦黑土耕作区侵蚀沟空间信息解译标志(图1、表1),为获得侵蚀沟空间信息提供基础数据。

依据前文所述的解译标志,开展侵蚀沟空间信息数据采集与验证审查工作。首先,借助ArcGIS操作平台,采用人工目视解译方式,对侵蚀沟边缘明显、形态稳定且对耕地造成破坏的条带状/面圆状的侵蚀沟进行空间信息提取。提取信息为侵蚀沟坐标、长度与面积。其中坐标以侵蚀沟中心点所在经纬度,沟道长度以侵蚀沟中心线长度为标准,而沟道面积则以侵蚀沟外围线构成的范围为依据。将目视解译结果与Google遥感影像对比验证,解译精度在95%以上。并结合外业实地调查对侵蚀沟矢量数量与形态进行进一步验证与修改工作。最终,形成海伦市黑土耕作区侵蚀沟分布图(图2)。

表1 侵蚀沟解译标志

Tab.1 Erosion gully interpretation symbols

序号	影像特征	典型侵蚀沟地理位置
a	侵蚀沟成条带状,颜色为白色,轮廓规则	127°04'42"E,47°21'42"N
b	侵蚀沟成条带状,颜色为淡绿色,轮廓规则且有植被覆盖	127°26'52"E,47°39'05"N
c	侵蚀沟成条带状,颜色为亮白色,轮廓规则且底部有裸土	126°46'09"E,47°20'20"N
d	侵蚀沟成条带状,颜色为白色	127°02'24"E,47°23'56"N
e	侵蚀沟成面圆状,颜色为白色	127°19'59"E,47°40'14"N

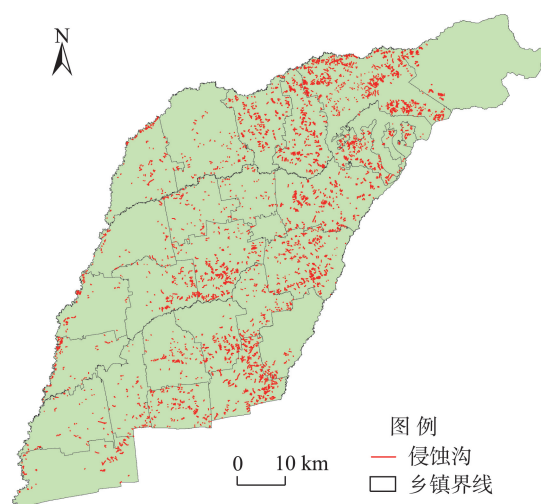


图2 海伦市耕作区侵蚀沟空间分布
Fig.2 Spatial distribution of erosion gullies
in the farming areas of Hailun City

2.3 研究方法

2.3.1 侵蚀沟的数量分布特征

沟道长度与沟道面积是判断区域侵蚀沟发育的基本信息,也是表达侵蚀沟数量特征的核心指标。在数理统计基础上,本文引用原指“衡量一个国家或地区居民收入差距”的基尼系数,表示侵蚀沟长度与面积的数量分布均衡度,综合衡量海伦黑土区侵蚀沟数量分布均衡特征,并选用洛伦兹曲线表示^[30]。参考国际惯例,当基尼系数值(G)大于0.4视为非均衡状态,反之亦然。洛伦兹曲线刻画由最小值到最大值排列形成的累计数量百分比特征。本文以侵蚀沟的数量累计百分比为横坐标,侵蚀沟长度/面积累计百分比为纵坐标,分别绘制海伦黑土耕作区侵蚀沟长度与面积的洛伦兹曲线。

2.3.2 侵蚀沟密度空间特征

侵蚀沟密度指单位面积内沟道长度^[31]。当侵蚀沟密度越大,表明对地表破坏能力越大。本文参考水利部《土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)》分析方法,构建侵蚀沟密度空间分析模型,并从500 m×500 m网格和镇域尺度分析海伦黑土耕作区侵蚀沟发育程度。侵蚀沟密度计算公式如下:

$$D = \frac{L}{A} \quad (1)$$

式中: D 为侵蚀沟密度值(km/km^2); L 为侵蚀沟总长度(km); A 为区域总面积(km^2)。

2.3.3 侵蚀沟裂度空间特征

侵蚀沟裂度是指单位面积内沟道面积所占比例^[32]。在相同侵蚀沟密度下,侵蚀沟裂度越大,表

明对地表侵蚀强度越大。因此,侵蚀沟裂度是本文衡量侵蚀沟侵蚀程度的另一指标。与密度空间分析特征相同,本文从500 m×500 m网格和乡镇尺度分析侵蚀沟裂度空间特征。计算公式如下:

$$C = \frac{S}{A} \quad (2)$$

式中: C 为侵蚀沟裂度值(%); S 为侵蚀沟总面积(km^2)。

2.4 侵蚀沟治理紧迫程度分析方法

如前所述,侵蚀沟的数量、密度和裂度是其对区域土壤侵蚀程度在不同维度的反映。其中,沟道数量反映区域侵蚀沟的影响范围,而沟道密度/裂度反映区域侵蚀沟的影响程度,三者均会影响区域耕作条件和侵蚀沟治理难度。因此,本文综合侵蚀沟的数量、密度和裂度特征衡量区域侵蚀沟总体状况,并基于综合评价方法探讨侵蚀沟治理紧迫程度,采取ArcGIS中的标准分类方法中的自然间断点分级法(Jenks)将侵蚀沟治理紧迫度(UC)值进行最恰当的分组,使之形成各类型间最大的差异化。因此,本文结合侵蚀沟数量、长度、面积情况,将侵蚀沟治理紧迫度划分为3个等级,分别为低紧迫度、紧迫度和极紧迫度。侵蚀沟治理紧迫程度分析模型如下:

$$UC = w_n \times s_n + w_d \times s_d + w_c \times s_c \quad (3)$$

式中:UC表示治理紧迫程度, w_n 、 w_d 、 w_c 分别表示侵蚀沟数量、长度与面积权重值, s_n 、 s_d 、 s_c 分别表示侵蚀沟数量、侵蚀沟密度、侵蚀沟裂度标准化值。为了保证权重赋值的客观性,式(3)的权重值由熵值法计算。熵值法是根据数据自身离散度特征来确定权重的客观赋权法^[33],计算结果详见表2。

3 结果分析

3.1 侵蚀沟的数量与结构特征

3.1.1 侵蚀沟数量特征

海伦黑土耕作区共有侵蚀沟4223条,总沟道长度为1030.17 km,平均沟道长度为0.24 km。结合基

表2 侵蚀沟治理紧迫程度指标权重

Tab.2 Indicator weights of gully erosion control urgency

指标	网格单元权重	乡镇单元权重
侵蚀沟数量	0.2520	0.3127
侵蚀沟密度	0.3402	0.3521
侵蚀沟裂度	0.4078	0.3352

尼系数(G)发现,2017年海伦黑土耕作区侵蚀沟数量分布呈现非均衡状态。具体而言,沟道长度基尼系数(G)为0.44,洛伦兹曲线显示长度排名前20%的侵蚀沟条数占总数量的48.48%,表明沟道长度处于0~500 m的侵蚀沟数量较多,其分布特征呈非均衡状态(图3)。而侵蚀沟总面积为19.23 km²,平均沟道面积为0.4 hm²,沟道面积基尼系数(G)为0.62,面积排名前20%的侵蚀沟条数占总数量的67.50%,说明沟道面积大小的分布处于显著的非均衡状态(图4)。

从乡镇层面看,不同乡镇侵蚀沟数量存在较大差异。其中,7个乡镇的侵蚀沟数量超过了200条,大部分乡镇的侵蚀沟长度均低于1000 m,分布有超过1000 m侵蚀沟的乡镇仅2个,而小于1000 m的乡镇有23个。结合箱线图发现(图5a),海伦市沟道长

度主要集中于0~500 m,而大于500 m的侵蚀沟分布在共荣乡与祥富镇。与此同时,各乡镇的沟道面积分布于0~0.8 hm²间,但各乡镇的沟道面积数量分布存在较大差异(图5b)。值得一提的是,农场沟道条数最多、沟道长度最长且沟道面积最大,这一现象与农场复杂的地形条件与集中规模化耕作模式有关。而海南乡与海北镇的沟道条数最少、沟道长度最短且沟道面积最小,其特征与较为完善的乡镇农田基础设施和较为广泛的土地整治工程等实际情况相符。

3.1.2 侵蚀沟结构特征

由表3可知,海伦黑土耕作区侵蚀沟类型主要为微型沟和小型沟,分别有2391和1443条。在同一类型侵蚀沟下,随着沟道等级逐级增加,其沟道侵蚀面积越来越大,则侵蚀程度愈来愈深。具体而言,微型和小型侵蚀沟中,一级和二级侵蚀沟占比最高,超过总数的85.00%;中型侵蚀沟则以二级和三级为主,占比63.99%;大型侵蚀沟中,四级和五级侵蚀沟的占比最高,为88.41%。整体来看,2017年海伦黑土耕作区侵蚀沟类型以微型和小型为主,级别大多为三级以下,处于轻度侵蚀阶段,未来侵蚀沟仍然存在进一步发育的可能。

从乡镇层面看,海伦市各乡镇沟道类型及其内部级别的结构差异显著(图6)。从沟道数量看,农场的侵蚀沟数量最多(超过900条);而海伦镇侵蚀沟不足50条。从沟道类型看,东风镇、东林乡、扎音河乡、前进镇与双录乡的小型沟明显多于其他乡镇。共荣乡与前进镇表现出全类型的结构特征,即存在微/小/中/大/巨型等类型侵蚀沟。从沟道等级看,侵蚀沟等级结构与类型结构特征基本相同,海伦镇由于侵蚀沟类型较少,而其他乡镇的侵蚀沟级别均在3种以上,尤其是爱民乡、百祥镇与共荣乡等乡镇兼有5种等级侵蚀沟。综合来看,侵蚀沟结构在海伦市不同乡镇间的差异明显。在县域范围内且地形相似下,相邻乡镇之间的侵蚀沟结构差异表明:除地形条件会影响侵蚀沟发育外,耕作行为和防治措施也是重要的影响因素。

3.2 侵蚀沟空间分布特征

3.2.1 网格尺度侵蚀沟的空间分布特征

2017年海伦黑土耕作区侵蚀沟密度空间分布整体呈现东高西低的空间格局(图7a)。其中,轻度侵蚀区域(侵蚀沟密度介于0.01~2.00 km/km²)主要分布在西南部;中度侵蚀区(2.00~3.00 km/km²)集中于北部与中部地区,呈散点式分布;强烈侵蚀区

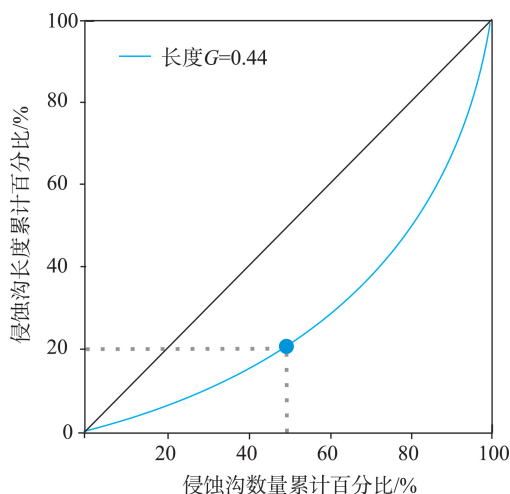


图3 侵蚀沟长度的洛伦兹曲线

Fig.3 Lorenz curve of erosion gully length

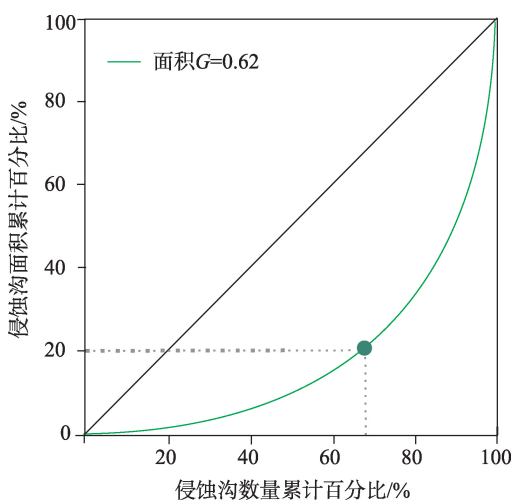


图4 侵蚀沟面积的洛伦兹曲线

Fig.4 Lorenz curve of erosion gully area

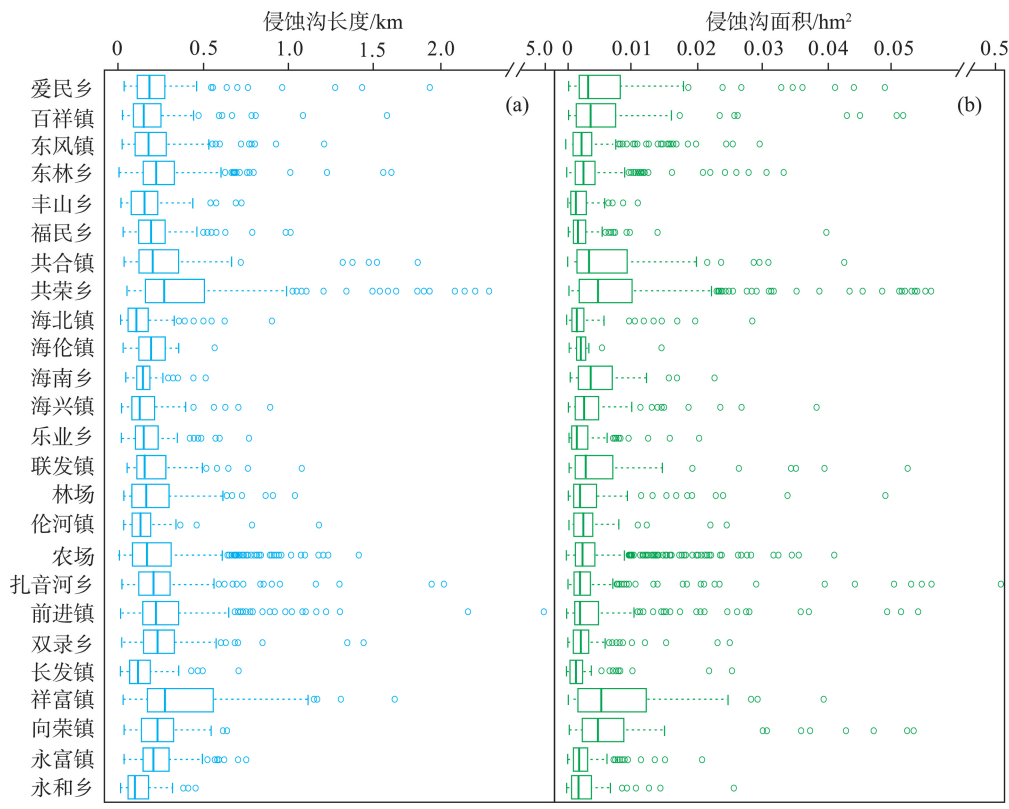


图5 各乡镇沟道长度和面积的数量分布特征

Fig.5 Quantitative distribution characteristics of the length and area of erosion gullies in the towns and townships of Hailun City

表3 侵蚀沟类型与等级结构数量分布
Tab.3 Distribution of erosion gully type and level (条)

侵蚀沟类型	一级沟	二级沟	三级沟	四级沟	五级沟	汇总
微型沟	1780	578	29	1	3	2391
小型沟	255	976	148	37	27	1443
中型沟	1	99	100	45	66	311
大型沟	2	1	5	48	13	69
巨型沟	1	0	0	0	8	9
汇总	2039	1654	282	96	152	4223

(3.00~5.00 km/km²)集中于东部与东南部地区,但在西部地区零星分布;极强烈(5.00~7.00 km/km²)与剧烈侵蚀区(>7.00 km/km²)主要分布于中部与东北部地区,且侵蚀面积较小。结合河流分布和地形特征发现,海伦侵蚀沟密度高的区域沿河分布特征明显,且主要分布于漫岗区向平川区过渡带。

在侵蚀沟裂度方面,2017年海伦黑土耕作区侵蚀沟裂度空间分布聚集特征不明显。侵蚀沟裂度以低值为主,在全域均有分布;而裂度高值区面积较小,主要分布在中部地区(图 7b)。从侵蚀强度等级看,轻强度侵蚀区(侵蚀沟裂度 0.0001%~0.10%)均匀分布于海伦黑土耕作区全域;而中度(0.10%~

0.25%)、强烈(0.25%~0.35%)、极强烈(0.35%~0.50%)与剧烈(>0.50%)强度侵蚀区主要分布在河流弯道两侧,其他少量的高值区域零星分布于低丘漫岗。

3.2.2 乡镇尺度侵蚀沟空间分布特征

从乡镇层面看,海伦各乡镇侵蚀沟密度的梯度性特征明显,呈从东北向西南递减趋势。其中剧烈侵蚀的乡镇仅有3个,主要位于东北部;而处于强烈与极强烈侵蚀状态的乡镇(7个)主要分布在海伦中部和东北部。轻度侵蚀和中度侵蚀的乡镇主要分布在海伦西部,共有15个。

在侵蚀裂度上,海伦市各乡镇侵蚀沟裂度的空间分布存在与密度类似的梯度特征(图 8b)。其中,极强烈与强烈侵蚀区位于海伦东北部,主要涉及林场、农场等5个乡镇,中度侵蚀区位于海伦西南部,而轻度侵蚀区主要分布在海伦中部。结合海伦自然地理条件分析可以发现,侵蚀强度高的乡镇主要是位于东北高程较高的乡镇。这些现象一方面受地形条件的影响,另一方面也与高强度的耕作模式和滞后的治理措施有关。

3.3 侵蚀沟治理紧迫程度分析

2017年海伦黑土耕作区侵蚀沟治理紧迫程度



图6 各乡镇侵蚀沟长度和面积的数量结构分布

Fig.6 Distribution of the length and area structure of erosion gullies in the towns and townships of Hailun City

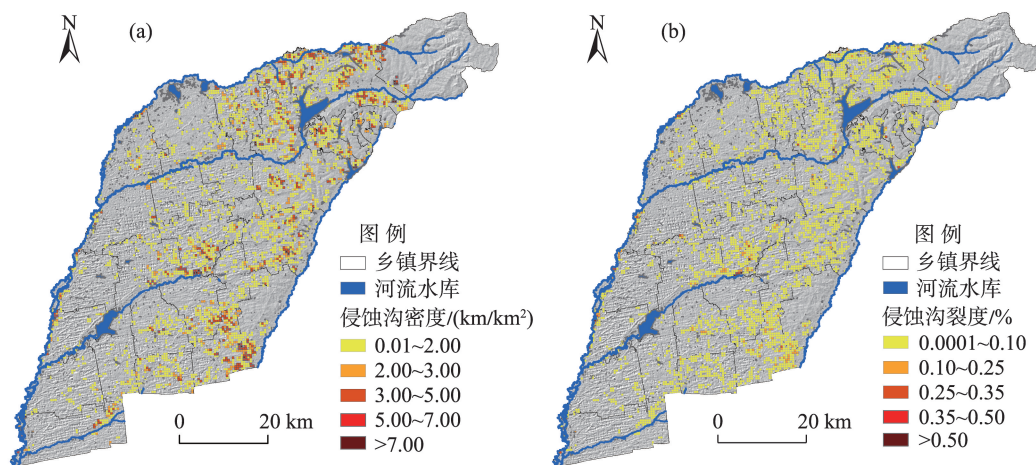


图7 网格尺度海伦侵蚀沟密度和裂度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of erosion gully density and dissected degree in Hailun City at the grid level

以低紧迫治理状态(占比67.06%)为主,处于不同紧迫程度的网格数量表现逐级减少的变化趋势(图9a)。从空间规律看,区域侵蚀沟治理紧迫程度呈现由东北向西南部逐步减弱的趋势。其中,低紧迫治理的侵蚀沟主要集中于海伦漫川漫岗区。紧迫治理的侵蚀沟(占总面积的24.52%)分布于低山漫丘

区与通肯河/扎音河/海伦河等主要河流沿岸。而极紧迫治理的侵蚀沟主要分布于低山低丘地区,且高程处于210~260 m之间,其侵蚀面积占总面积的8.42%。

从乡镇层面看,海伦市各乡镇侵蚀沟治理紧迫程度自东北向西南方向呈逐级递减趋势变化(图

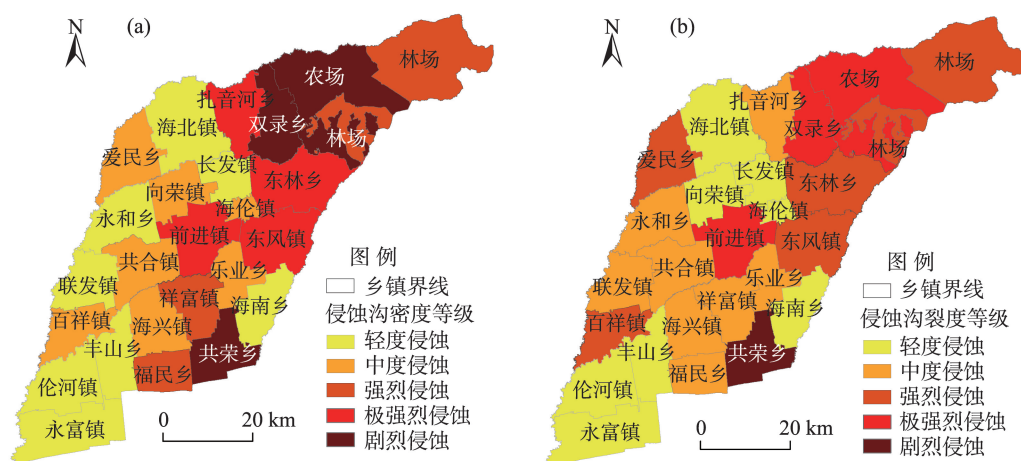


图8 乡镇尺度海伦侵蚀沟密度和裂度空间分布状况

Fig.8 Spatial distribution of erosion gully density and dissected degree in Hailun City at the town and township level

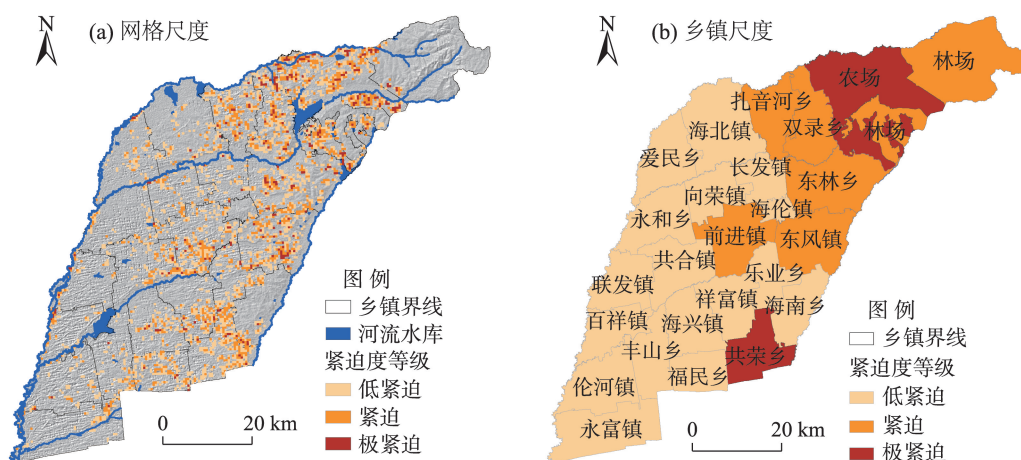


图9 网格尺度和乡镇尺度海伦侵蚀沟治理紧迫程度空间分布状况

Fig.9 Spatial pattern of gully erosion control urgency in Hailun City at the grid level and the town and township level

9b)。具体而言,极紧迫治理侵蚀沟的乡镇为2个,主要为海伦北部的农场和南部的共荣乡,其地形特征以低山漫丘为主;紧迫治理侵蚀沟的乡镇为4个,分布在海伦东北部双录乡、东林乡、东风镇与前进镇,其地形特征以漫丘漫岗为主;而低紧迫治理的乡镇为19个,位于海伦中西部地区。

4 讨论与结论

4.1 讨论

侵蚀沟的空间分布与地形地貌密切相关,符合地理学垂直地带性空间分异规律,已有研究从微观尺度证实了这一规律^[8,10-11,25]。具体而言,姜芸等^[11]的研究表明,细沟和浅沟主要分布在 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 和 $6^{\circ}\sim 15^{\circ}$

的坡面上,而切沟和冲沟则主要分布在 $0\sim 2^{\circ}$ 、 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 的坡面上;李镇等^[25]的研究发现相比漫川漫岗区,山地丘陵区侵蚀沟更细长,沟缘位置更复杂。而本文通过对镇域尺度侵蚀沟治理紧迫度的分析,从中宏观尺度为这一规律提供了新的证据,2017年海伦黑土耕作区各乡镇的侵蚀沟治理紧迫度呈现自西南向东北逐渐增加的特征,这与区域内自然地形地貌的分布特征相一致,即河漫滩、河阶地、高平原与低丘陵的分布特征。从数量特征分析发现,海伦黑土耕作区侵蚀沟的数量特征分布呈现非均衡状态,具体而言,随着沟道长度类型增加,侵蚀沟条数逐渐减少。海伦黑土耕作区侵蚀沟的数量分布特征以微/小型沟(沟道长度 ≤ 500 m)为主,研究结果与姜芸等^[11]以黑龙江省嫩江县为典型研究区开展侵蚀沟

形态分布特征研究所得结果保持一致。本文在此基础上进一步发现,随着沟道等级逐级增加,其沟道侵蚀面积越来越大,侵蚀程度愈来愈深(表3)。因此,本文提出海伦黑土耕作区侵蚀沟发育正处于轻度侵蚀阶段,仍然存在继续侵蚀耕地的可能性。这一结果符合第一次全国水利普查成果与《东北黑土区侵蚀沟治理专项规划(2016—2030年)》所述结论。总体而言,海伦黑土耕作区侵蚀沟表现出条数多、长度短、面积小、程度轻、分布不均衡等特征。

在耕地保护严控阶段,“全局防控、重点治理”的区域侵蚀沟防治方案无疑是精准把控耕地数量、质量与生态三位一体保护的有力途径。乡镇级作为区域侵蚀沟防治工作的具体落实单位,需要综合把握区域内侵蚀沟发育状态与治理紧迫程度,从而明确区域侵蚀沟全局防控方向与重点治理范围。本文基于乡镇与网格尺度探讨区域侵蚀沟治理紧迫度,试图解释区域侵蚀沟治理的层次性。结合乡镇尺度侵蚀沟的空间特征结果(图6~9),本文发现侵蚀沟形态分布与区域地形地貌直接相关,这一结果与李君兰等^[34]、张兴义等^[8]的“当坡面、坡形等条件需要达到特定的临界条件下侵蚀沟才可发生”的结果类似。进一步而言,在县域范围内地形相似的相邻乡镇间,侵蚀沟结构差异表明:耕作行为和防治措施是改变侵蚀沟发生的另一因素。在未来区域侵蚀沟防治规划与实施中,县级主管部门应该综合分析乡镇沟道侵蚀程度,采取局部整治、重点预防、资金补偿等管理手段加以优先防控;而在工程项目落实上,乡镇主管部门可以依据以网格尺度侵蚀沟治理紧迫程度进行实地察看与重点监测。

本文以数量、密度、裂度等要素构建区域侵蚀沟治理指标体系,试图从侵蚀范围与程度等两个层面揭示区域侵蚀沟侵蚀程度,虽然揭示了不同区位侵蚀沟侵蚀程度与空间分布规律,但受当前高分与资源遥感卫星数据的可获得性影响,未能将时序演变规律纳入侵蚀沟治理程度的时空特征及分异规律,进行全面细致的刻画。但需要说明的是,当前阶段侵蚀沟空间分布特征分析既是时空演变的结果,又是深入分析不同侵蚀沟形态治理的前提。因此,在未来的研究中,我们将基于本文研究结果,借助于土地利用工程相关理论,开展更为详细的时空特征分析与治理途径研究,为防治土壤侵蚀与提升耕地集约规模利用提供有益方案。

4.2 结论

不同自然地理区位与社会经济条件下耕作区侵蚀沟发育状态与空间分布呈现明显的异质性,而从数量、长度、面积等要素出发对这一分布规律的综合研究有助于提出针对性治理措施,改善由其引致的耕地破碎化。基于2017年海伦黑土耕作区侵蚀沟空间信息数据,借助数理统计、空间分析与综合评价方法,从网格与乡镇尺度系统刻画并解释了海伦黑土耕作区侵蚀沟的数量与空间分布规律,探讨了不同区域侵蚀沟治理紧迫程度。结果表明:

(1) 在数量特征方面,海伦黑土耕作区侵蚀沟数量特征呈现非均衡状态。其中,从沟道长度看,海伦侵蚀沟以微小型沟为主,主要分布在0~500 m之间,其基尼系数为0.44;而沟道面积上,侵蚀沟面积主要介于0~0.80 hm²,其基尼系数是沟道长度的1.5倍。总之,数量多、长度短与面积小是海伦市黑土区侵蚀沟的主要特征。

(2) 从空间特征上看,海伦侵蚀沟密度自东北向西南方向呈逐渐减少特征,高密度区主要分布于海伦市低丘漫岗带。网格尺度侵蚀沟密度从剧烈到轻度表现出明显的阶梯式分布特征;网格尺度侵蚀沟裂度以低强度侵蚀为主,并连续分布于海伦黑土耕作区全域。总体而言,极强烈与剧烈侵蚀强度区处于海伦市海拔较高地区,加之耕作强度较大,削减了土壤的抗侵蚀能力。

(3) 在治理紧迫度方面,2017年海伦黑土耕作区侵蚀沟治理紧迫度以低紧迫治理状态为主,占比67.06%,从乡镇层面空间特征上呈现由东北向西南逐步减弱的趋势,主要分布于低山低丘地区且海拔较高。紧迫以上治理紧迫程度的乡镇主要分布于低山/漫丘漫岗地区,位于海伦东北部。自然地形地貌决定着侵蚀沟发生条件。在县域范围内地形相似的相邻乡镇间,侵蚀沟结构差异表明:耕作行为和防治措施是改变侵蚀沟发生的另一因素。

参考文献(References)

- [1] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望 [J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041. [Han Xiaozeng, Li Na. Research progress of black soil in Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1032-1041.]
- [2] 欧洋, 阎百兴, 白建宏, 等. 东北黑土区侵蚀沟危害面积识别研究 [J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 24-30. [Ou Yang, Yan Baixing, Bai Jianhong, et al. Identifying the damaged area of gully in black soil region of North-

- east China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(6): 24-30.]
- [3] 马冰滢, 黄姣, 李双成. 基于生态—经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(1): 26-37. [Ma Bingying, Huang Jiao, Li Shuangcheng. Optimal allocation of land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on ecological and economic benefits trade-offs. *Progress in Geography*, 2019, 38(1): 26-37.]
- [4] Liu X B, Li H, Zhang S M, et al. Gully erosion control practices in Northeast China: A review [J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): 5065. doi: 10.3390/su11185065.
- [5] 朱连奇, 冯文峰, 朱文博. 土壤侵蚀研究中的“3S”技术应用进展 [J]. *地理科学进展*, 2008, 27(6): 57-62. [Zhu Li-anqi, Feng Wenfeng, Zhu Wenbo. Progress of "3S" technique application in soil erosion study. *Progress in Geography*, 2008, 27(6): 57-62.]
- [6] 廖小罕. 地理科学发展与新技术应用 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(5): 709-715. [Liao Xiaohan. Advance of geographic sciences and new technology applications. *Progress in Geography*, 2020, 39(5): 709-715.]
- [7] 张兴义, 刘晓冰. 东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 320-326. [Zhang Xingyi, Liu Xiaobing. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of Northeast China. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(3): 320-326.]
- [8] 张兴义, 刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策 [J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 340-344. [Zhang Xingyi, Liu Xiaobing. Key issues of mollisols research and soil erosion control strategies in China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(4): 340-344.]
- [9] 刘卉芳, 单志杰, 秦伟, 等. 东北黑土区水土流失治理技术与模式研究评述 [J]. *泥沙研究*, 2020, 45(4): 74-80. [Liu Huifang, Shan Zhijie, Qin Wei, et al. Review on soil and water loss control techniques and models in the black soil regions in the Northeast. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(4): 74-80.]
- [10] Li Z, Zhang Y, Zhu Q K, 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.
- [11] 姜芸, 王军, 张莉. 东北典型黑土区侵蚀沟形态及分布特征 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 157-165. [Jiang Yun, Wang Jun, Zhang Li. Morphology and distribution characteristics of erosion gully in the typical black soil region of Northeast China. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(7): 157-165.]
- [12] Frankl A, Nyssen J, Adgo E, et al. Can woody vegetation in valley bottoms protect from gully erosion? Insights using remote sensing data (1938–2016) from subhumid NW Ethiopia [J]. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(7): 2055-2068.
- [13] Walker S J, Wilkinson S N, van Dijk A I J M, et al. A multi-resolution method to map and identify locations of future gully and channel incision [J]. *Geomorphology*, 2020, 358: 107115. doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107115.
- [14] 蒲罗曼, 张树文, 王让虎, 等. 多源遥感影像的侵蚀沟信息提取分析 [J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(1): 90-94. [Pu Luoman, Zhang Shuwen, Wang Ranghu, et al. Analysis of erosion gully information extraction based on multi-resource remote sensing images. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(1): 90-94.]
- [15] 于佩鑫, 周询, 刘素红, 等. 东北黑土区侵蚀沟遥感影像特征提取与识别 [J]. *遥感学报*, 2018, 22(4): 611-620. [Yu Peixin, Zhou Xun, Liu Suhong, et al. Feature extraction and recognition of erosion gully based on remote sensing image in the black soil region in Northeast China. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(4): 611-620.]
- [16] Guo M M, Wang W L, Shi Q H, et al. An experimental study on the effects of grass root density on gully head-cut erosion in the gully region of China's Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(17): 2107-2125.
- [17] 胡天然, 王树力. 东北黑土区乌裕尔河流域侵蚀沟变化过程及影响因素 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(1): 113-119. [Hu Tianran, Wang Shuli. Factors affecting gully erosion Wuyuer River watershed of the black soil region. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 42(1): 113-119.]
- [18] Wang D C, Fan H M. Distribution characteristics of gullies with slope gradient in Northeast China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(6): 1-12.
- [19] Zhao J L, Vanmaercke M, Chen L Q, et al. Vegetation cover and topography rather than human disturbance control gully density and sediment production on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2016, 274: 92-105.
- [20] 周嵘, 陈芳孝, 赵宇, 等. 强化遥感等现代信息技术应用不断提升首都水土保持工作水平 [J]. *中国水土保持*, 2018(3): 6-7. [Zhou Rong, Chen Fangxiao, Zhao Yu, et al. Continuously improve the working level of soil and water conservation of Beijing through strengthening the application of modern information technology including remote sensing. *Soil and Water Conservation in China*, 2018(3): 6-7.]
- [21] 丁婧祎, 赵文武, 王军, 等. 降水和植被变化对径流影响的尺度效应: 以陕北黄土丘陵沟壑区为例 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(8): 1039-1051. [Ding Jingyi, Zhao

- Wenwu, Wang Jun, et al. Scale effect of the impact on runoff of variations in precipitation/vegetation: Taking northern Shaanxi loess hilly-gully region as an example. *Progress in Geography*, 2015, 34(8): 1039-1051.]
- [22] 刘宝元, 杨扬, 陆绍娟. 几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义 [J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(1): 9-16. [Liu Baoyuan, Yang Yang, Lu Shaojuan. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(1): 9-16.]
- [23] 闫业超, 张树文, 岳书平. 克拜东部黑土区侵蚀沟遥感分类与空间格局分析 [J]. *地理科学*, 2007, 27(2): 193-199. [Yan Yechao, Zhang Shuwen, Yue Shuping. Classification of erosion gullies by remote sensing and spatial pattern analysis in black soil region of eastern Kebai. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 193-199.]
- [24] Garosi Y, Sheklabadi M, Pourghasemi H R, et al. Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping [J]. *Geoderma*, 2018, 330: 65-78.
- [25] 李镇, 秦伟, 齐志国, 等. 东北漫川漫岗和山地丘陵黑土区侵蚀沟形态特征遥感分析 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 133-140. [Li Zhen, Qin Wei, Qi Zhiguo, et al. Remote sensing analysis on gully morphology and spatial distribution in rolling hilly region and mountainous and hilly region of Northeast China. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(14): 133-140.]
- [26] 赵影, 董爽, 贾玉华. 陕北六道沟流域切沟形态复杂性及其类型划分 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(5): 1292-1299. [Zhao Ying, Dong Shuang, Jia Yuhua. Morphological complex and classification of gullies in the Liudagou minor drainage basin in north Shaanxi Province. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1292-1299.]
- [27] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国水利行业标准: 土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 8-9. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Water Resources Standard (Irrigation) of the People's Republic of China: Standards for classification and gradation of soil erosion. SL 190—2007*. Beijing, China: China Water Power Press, 2008: 8-9.]
- [28] 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: SL444—2009 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 5-6. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Techniques standard for comprehensive control of soil erosion in the black soil region: SL444—2009*. Beijing, China: China Water & Power Press, 2009: 5-6.]
- [29] Sepuru T K, Dube T. An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018, 9: 1-9.
- [30] 李全峰, 胡守庚, 瞿诗进. 1990—2015年长江中游地区耕地利用转型时空特征 [J]. *地理研究*, 2017, 36(8): 1489-1502. [Li Quanfeng, Hu Shougeng, Qu Shijin. Spatiotemporal characteristics of cultivated land use transition in the Middle Yangtze River from 1990 to 2015. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1489-1502.]
- [31] 陈单, 张树文, 王让虎, 等. 基于Pleiades影像的东北黑土区沟蚀分异特征研究 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2016, 48(4): 138-144. [Chen Dan, Zhang Shuwen, Wang Ranghu, et al. Study on gully erosion distribution in northeast black soil areas based on Pleiades. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 48(4): 138-144.]
- [32] 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 [J]. *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.]
- [33] 洪惠坤, 廖和平, 李涛, 等. 基于熵值法和Dagum基尼系数分解的乡村空间功能时空演变分析 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 240-248. [Hong Huikun, Liao Heping, Li Tao, et al. Analysis of spatio-temporal patterns of rural space function based on entropy value method and Dagum Gini coefficient. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(10): 240-248.]
- [34] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1319-1325. [Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1319-1325.]

Spatial pattern of gully erosion control urgency in black soil farming area

LI Quanfeng^{1,2}, LI Jicheng¹, YU Mingpeng^{3*}, GUO Xinxin¹

(1. College of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Land Remote Sensing Big Data Technology Innovation Center, Harbin 150030, China;

3. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: A comprehensive understanding of the development status of erosion gullies and the urgency of their erosion control can provide an important reference for effectively identifying the direction and key areas of regional gully erosion prevention and control. Combined with the spatial data of erosion gullies, this study constructed an evaluation index of regional gully erosion control urgency. The distribution characteristics of erosion gullies in the black soil farming area of Hailun City in 2017 were analyzed at the town and township level and the grid level, revealing the extent of gully erosion and its spatial distribution patterns. The results show that: 1) Quantitatively, the distribution of erosion gullies in Hailun black soil farming area is unbalanced. The length of gullies is mainly micro/small (≤ 500 m), and the area of gullies is of class I and II (≤ 0.8 hm²). Overall, the erosion gullies are of large number, short length, and small area. 2) Spatially, the density of erosion gullies at the grid level gradually increased from the southwest to the northeast, while their dissected degree was mainly light, and there was no significant spatial difference across the area. The density of erosion gullies at the town and township level was mainly low, and the gullies were mainly distributed in the west of Hailun, while their dissected degree was mainly moderate/intensive and they are mainly distributed in the northwest and southeast of Hailun City. 3) The erosion control urgency of erosion gullies in Hailun black soil farming area in 2017 was mainly in the low urgency state, accounting for 67.06% of the area, which was mainly distributed in the plain and hilly areas, located in the western townships of Hailun; and the urgent/extremely urgent states were mainly found in the low mountain and hilly areas, located in the northeast of Hailun. In the planning of regional gully erosion control, the city government should give priority to the prevention and control of serious erosion areas according to the urgency state of town and township gully erosion control, while the town and township governments can carry out field investigation and key area monitoring according to the urgency of gully erosion control identified at the grid scale.

Keywords: erosion gully; distribution characteristics; monitoring and supervision; erosion control urgency; farming land; black soil area in Northeast China