

# 东北黑土区不同垄向耕地沟蚀与地形耦合规律

宁 静, 杨 子, 姜 涛, 杨 双, 党思宇

(东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

**摘 要:**东北黑土区在长期高强度开垦连作下,侵蚀沟切割耕地地表现象严重。以黑龙江省宾县的两个典型乡镇为研究区,基于 GIS 和 RS 技术,采用全局空间自相关、样方网格等方法,综合垄向、侵蚀沟、地形数据探究区域尺度下垄向分布及不同垄向耕地沟蚀与地形因子耦合规律。结果表明:(1)不同乡镇沟蚀空间集聚程度不同,主导性垄向耕地内的侵蚀程度最高;(2)垄向在耕地上的分布有很强的空间自相关性,不同的垄向空间分布是对地形条件的反馈体现,合理的垄向空间分布会起到降低沟蚀密度的作用;(3)除糖坊镇斜垄外,不同垄向耕地沟蚀密度随海拔的升高呈现先增大后减小的趋势。糖坊镇不同海拔级优势垄向规律性不强,三宝乡整体上任意海拔级斜垄耕作最优;(4)坡度与坡长交互作用显著。两乡镇表现为“小坡度”+“小坡长”或“小坡度”+“大坡长”条件横垄耕作最优,“大坡度”+“小坡长”或“大坡度”+“大坡长”条件斜垄耕作最优;(5)黑土区漫川漫岗地带斜垄耕作更具水土保持作用。

**关键词:**沟蚀; 耕作垄向; 地形; 耦合规律; 东北黑土区

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0029-08

## The Coupling Laws Between Gully Erosion of Cultivated Lands with Different Ridge Directions and Terrain in Northeast Black Soil Region of China

NING Jing, YANG Zi, JIANG Tao, YANG Shuang, DANG Siyu

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

**Abstract:** With the long-term over-cultivating and continuous cropping in the northeast black soil region of China, it has been a severe problem that the erosion gullies cut up the cultivated land surface. We took two towns in Bin County of Heilongjiang Province as the typical areas. The spatial distribution and the coupling laws between gully erosion of cultivated lands with different ridge directions and terrain in regional scale were studied based on the GIS and RS technology, integrated ridge direction, erosion gully, DEM data, global spatial autocorrelation, sample of grid and so on. The results showed that: first, the spatial agglomeration of gully erosion was not the same in different towns, erosion degree of the dominant ridge direction in cultivated land was the most serious; second, the distribution of ridge direction in cultivated land showed an obvious spatial autocorrelation, the different spatial distribution of ridge direction was the feedback toward the terrain conditions, and the reasonable spatial distribution of ridge direction played a role in reducing gully density; third, gully density of different ridge directions in cultivated lands increased first and then decreased with the elevation rising in addition to askew ridge of Tangfang Town. The regularity of optimal ridge direction in different elevation levels was not obvious in Tangfang Town, askew ridge tillage in any elevation level was optimal in Sanbao Town; fourth, the interaction between slope length and slope gradient was significant, showing that the horizontal ridge tillage was optimal under the condition of ‘small slope gradient’+‘small slope length’ or ‘big slope gradient’+‘small slope length’, and the askew ridge tillage was optimal under the condition of ‘small slope gradient’+‘big slope length’ or ‘big slope gradient’+‘big slope length’ in both towns; fifth, askew ridge tillage has significant effect on water and soil conservation in rolling hill regions of black soil area.

**Keywords:** gully erosion; tillage ridge direction; terrain; coupling laws; northeast black soil region of China

土壤侵蚀是导致土地退化、土壤肥力下降、生态环境恶化的主要原因,直接影响区域生态环境和社会经济的可持续发展,已成为全球领域普遍关注的重要环境问题之一<sup>[1]</sup>。土壤水力侵蚀是自然侵蚀的结果,由耕作方式不同引起的耕作侵蚀已成为国内外共同关注的重要内容。其中,欧美研究者首先涉足耕作侵蚀研究,进行了大量耕作侵蚀试验,构建耕作侵蚀模型、评价耕作侵蚀强度<sup>[2-3]</sup>。国内的王占礼等人于 2002 年在我国黄土区正式开展了耕作侵蚀研究,进一步探究了耕作侵蚀对总土壤侵蚀的贡献<sup>[4]</sup>。与此同时,其他学者也从不同角度探究了耕作方式对浅沟产沙及形态发育特征和土壤养分的影响,并取得了一定进展<sup>[5-6]</sup>。中国东北黑土区土壤肥沃,是我国重要的商品粮基地。但经过近几十年的高强度开垦连作,耕地退化、生态环境恶化等问题逐渐凸显<sup>[7]</sup>。相关资料显示,沟蚀是东北黑土区土壤侵蚀的主导类型,侵蚀沟广泛分布在坡耕地上,数量高达 25 万余条,总占地 48.3 万  $\text{hm}^2$ <sup>[8]</sup>,侵蚀速度在世界三大黑土带范围均罕见<sup>[9]</sup>。已有研究侧重揭示沟蚀的自然侵蚀过程与机理<sup>[10-11]</sup>,有学者指出,耕作侵蚀是导致黑土区坡耕地水土流失最根本的侵蚀方式<sup>[2]</sup>,但由耕作方式产生沟蚀的相关研究鲜有报道。垄作是东北黑土区一种非常普遍的耕作方式,耕作行与等高线纵横方向夹角显著影响径流<sup>[12-13]</sup>,进而会影响侵蚀沟的产生。由于耕地沟蚀过程的复杂性,在区域尺度上不同垄向对耕地沟蚀的影响机制尚未清楚<sup>[14-15]</sup>,不同垄向耕地沟蚀与地形等外部指标间的作用关系也有待进一步研究。

本文以东北黑土区宾县两个典型乡镇为研究区,以野外实地调查与 SPOT 高分辨率影像为基础,结合 DEM 数据获得垄向、侵蚀沟与地形因子,对宾县糖坊镇和三宝乡沟蚀强度,垄向空间分布及不同垄向耕地沟蚀与地形因子耦合规律进行分析,完善垄向作为影响土壤沟蚀因子的相关研究,进一步揭示区域尺度侵蚀沟在耕作侵蚀与土壤水蚀交互作用下的分布规律,为黑土区制定科学合理的保护性耕作措施提供科学依据。

## 1 研究区概况

宾县位于典型黑土带东部边缘,地处松嫩平原与张广才岭交汇处,地理坐标为东经  $126^{\circ}55'41''$ — $128^{\circ}19'17''$ ,北纬  $45^{\circ}30'37''$ — $46^{\circ}01'20''$ ,是黑龙江省五个国家级黑土区水土流失治理重点工程县之一。自然概况为“五山半水四分半田”,地形多为漫川漫岗和台地低丘。地势南高北低,南部山地呈条状沿东南县境延伸,中部为丘陵地带,北部邻接松花江为河谷平原。境内划分五个气候区,年平均气温  $4.4^{\circ}\text{C}$ ,属中温带

大陆性季风气候。年平均无霜期为 110~150 d,多年平均有效积温  $2\ 769^{\circ}\text{C}$ 。春季干旱少雨,夏季雨量集中,多年平均降水量为 550 mm,多年平均蒸发量为 910 mm<sup>[16-17]</sup>。境内有 8 条主河流,24 条支流及百余条沟溪穿过河谷平原。黑土主要分布于漫岗丘陵区,占全境 28.5%<sup>[18]</sup>。

主要土地利用类型为耕地,以旋耕起垄连作为主。耕地主要分布在中部低山丘陵区 and 北部沿江河谷平原,南部山区存在大量坡耕地。自然条件和耕作方式的复合作用致使沟蚀切割耕地地表现象显著,细沟、浅沟持续发育,切沟、冲沟广泛分布。本文以宾县糖坊镇和三宝乡为典型小区,两处分位于北部河谷平原和南部山地,地形条件差异较大。根据实地调研糖坊镇以顺垄耕作为主,三宝乡以横垄耕作为主。选择两乡镇目的是试图从差异中找寻不同垄向耕地沟蚀与地形因子耦合的一般规律。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 耕地垄向数据提取

本文采用 2013 年 SPOT 影像(分辨率 2.5 m),结合高分辨率 Google Earth 可视化地形起伏勾画糖坊镇与三宝乡行政界线内耕地地块数据。垄向判别基于 ArcGIS 9.3 中 raster surface 函数,利用 ASTERG DEM 30 m 分辨率高程影像内插为 10 m 间隔等高线,综合文献<sup>[13,19]</sup>以等高线与耕地垄行夹角关系为判别依据。具体判别方法为:当等高线与垄向夹角在  $0^{\circ}$ — $10^{\circ}$  时,定义此类垄向为顺垄,属性编码为 SL,如图 1A 所示;当等高线与垄向夹角在  $10^{\circ}$ — $80^{\circ}$  时,定义此类垄向为斜垄,属性编码为 XL,如图 1B 所示;当等高线与垄向夹角在  $80^{\circ}$ — $90^{\circ}$  时,定义此类垄向为横垄,属性编码为 HL,如图 1C 所示。

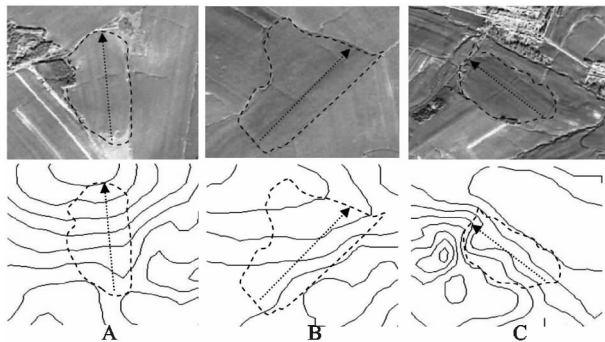


图 1 耕地垄向判别示意图

### 2.2 侵蚀沟数据提取

侵蚀沟数据同样依据 2013 年 SPOT 影像、Google Earth 影像,参考文献<sup>[20]</sup>对侵蚀沟发育分类进行室内判读。根据相关研究,除河沟以外,其余沟谷都具有较强侵蚀能力,均属侵蚀沟范畴<sup>[21]</sup>。但通

常情况,细沟和细沟间侵蚀算作坡面侵蚀,不计入沟蚀<sup>[20]</sup>。同时,受制于影像精度,长度小于2.5 m的浅沟也不在本文讨论范围内。根据道路通达性挑选两地侵蚀沟总数的2%,在2015年4月对室内判读的侵蚀沟及所在耕地地块垄向进行了实地验证,侵蚀沟及垄向数据解译精度分别达到92%和87%。同时,对难以判读位置进行野外辨认并建立野外标志,最后返回室内进行修正。

### 2.3 研究方法

2.3.1 沟蚀密度网格化 常用分析沟蚀强度指标为沟蚀密度,指单位面积内侵蚀沟总长度<sup>[21]</sup>。公式如下:

$$D = \frac{C}{S} \quad (1)$$

式中: $C$ ——侵蚀沟总长度(m); $S$ ——总面积( $\text{km}^2$ ); $D$ ——沟蚀密度值( $\text{m}/\text{km}^2$ )。沟蚀密度能够在宏观尺度上统计区域侵蚀沟空间分布强度,是地形发育阶段、降水量、地势高差、土壤渗透能力和地表抗蚀能力综合标示值<sup>[22]</sup>。为体现沟蚀强度空间分布并统计不同沟蚀强度面积,本文均匀建立覆盖研究区 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 样方网格,计算各样方网格内沟蚀密度值并重新分级。

2.3.2 Global Moran's  $I$  指数 本文应用全局空间自相关检验糖坊镇、三宝乡垄向分布是否具有空间自相关性并测量其空间聚集程度。采用指标是 Global Moran's  $I$  指数<sup>[23]</sup>。计算公式为:

$$I = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (2)$$

式中: $n$ ——区域单元个数; $x_i$ ——现象属性值在区域单元 $i$ 上的观测值, $i=1,2,3,\dots,n$ ;  $w_{ij}$ ——空间权重系数矩阵,表示各区域单元空间邻近关系。

空间自相关是区域化变量基本属性之一,而空间自相关统计量可用于检测研究区域内变量分布是否具有结构性<sup>[23]</sup>。Global Moran's  $I$  值介于 $-1 \sim 1$ ,大于0为正相关,值越大表示分析变量在空间上越聚集;小于0为负相关,值越小表示分析变量在空间上越分散;而当值等于0时,表示变量在空间上随机分布。显著性检验统计量用 $Z$ ,取 $\alpha=0.05$ ,当 $Z < -1.96$ 或 $Z > 1.96$ 时,拒绝零假设,观测变量空间自相关显著,观测属性在空间上呈离散格局( $Z < -1.96$ )或集聚格局( $Z > 1.96$ );反之,则接受零假设,观测变量在空间上呈随机分布<sup>[24]</sup>, $Z$ 值越大表明空间自相关性越强。

2.3.3 地形因子提取 本文所应用的坡度、海拔、坡长地形因子数据源为 ASTERG DEM 30 m 分辨率高程影像。坡度利用 ArcGIS 9.3 Slope 函数计算;海拔为 DEM 原始数据;坡长在 ArcGIS 9.3 水文分析模块下

参考文献<sup>[25]</sup>求出。三种地形因子均通过 ArcGIS 9.3 Reclassify 函数进行栅格数据重分类。常规统计应用 Excel 2003,线性回归分析应用 SPSS 16.0。

## 3 结果与分析

### 3.1 沟蚀强度空间分布

根据相关研究<sup>[26]</sup>,同时结合实地野外调查,如果沿用水利部中沟蚀分级标准将造成侵蚀沟现状失真,许多在发育中的浅沟或长度较小的冲沟将无法体现。因此,结合研究区实际情况,本文将沟蚀密度共分为 $0 \sim 100, 100 \sim 300, \dots, 700 \sim 900, >900\text{ m}/\text{km}^2$ 共6级,不同网格颜色代表不同沟蚀分级,见图2。

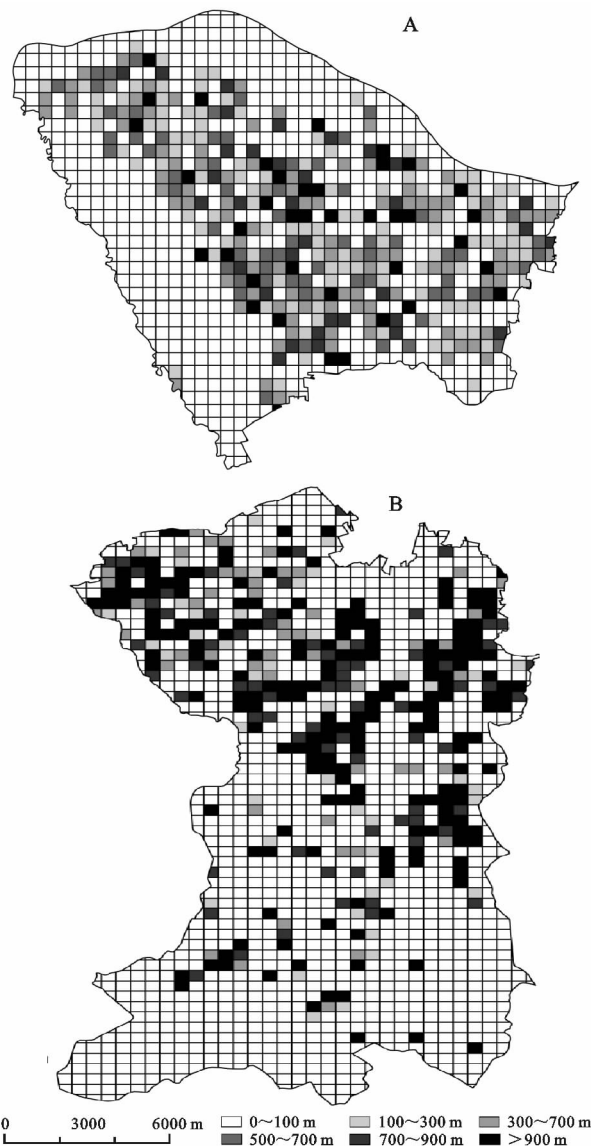


图2 沟蚀强度空间分布

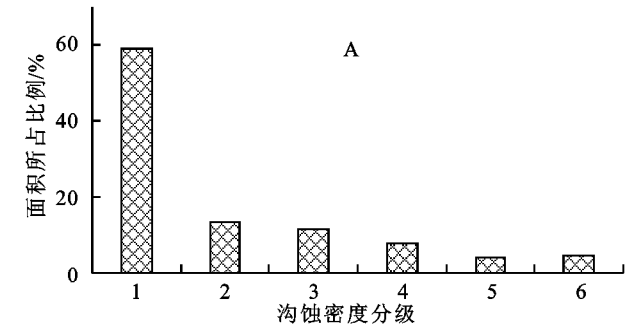
由图2A可知,糖坊镇整体侵蚀沟分布较为广泛,侵蚀面积相对较多但沟蚀剧烈集中现象不明显。结合图3A来看,糖坊镇 $0 \sim 100\text{ m}/\text{km}^2$ 沟蚀密度级网格分布面积为 $124.98\text{ km}^2$ ,占总面积的59.04%。 $100 \sim 300\text{ m}/\text{km}^2$ 和 $300 \sim 500\text{ m}/\text{km}^2$ 沟蚀密度级网格分布次

之,500~700 m/km<sup>2</sup> 及以上沟蚀密度级网格面积相对较少,分别占总面积的 7.62%,3.96%和 4.51%。

由图 2B 可知,三宝乡侵蚀沟主要分布在北部耕作区,沟蚀强度剧烈集中现象明显,高沟蚀强度面积显著高于糖坊镇。结合图 3B,三宝乡 0~100 m/km<sup>2</sup> 沟蚀密度级网格分布最多面积为 225.02 km<sup>2</sup>,占总面积的 71.29%。>900 m/km<sup>2</sup> 沟蚀密度次之,为 50.17 km<sup>2</sup>,占总面积的 15.89%。其余四个沟蚀密度级网格面积较为均衡,所占比例分别为 3.38%,3.99%,2.92%和 2.53%。

3.2 三种垄向耕地沟蚀分布

研究区主要耕作垄向为顺垄、横垄和斜垄。图 4A 体现了两乡镇不同垄向的耕地地块数和占耕地总



面积的百分比。由图 4A 可知,糖坊镇顺垄地块数为 755 块,占耕地面积比重最大,为 31.2%,顺垄耕种占主导地位。三宝乡横垄地块数为 878 块,占耕地面积比重最大,为 25.71%,横垄耕种占主导地位。

将垄向、侵蚀沟数据叠加得到不同垄向耕地沟蚀密度值,以此表示不同耕作垄向侵蚀强度。由图 4B 可知,糖坊镇顺垄沟蚀密度最高,为 1 268.09 m/km<sup>2</sup>,呈现顺垄>横垄>斜垄次序。三横垄沟蚀密度最高,为 1 073.92 m/km<sup>2</sup>,呈现横垄>斜垄>顺垄次序。整体而言,糖坊镇顺垄侵蚀现象突出,三宝乡横垄侵蚀现象突出,两乡镇均表现为占主导性垄向的侵蚀程度最严重。

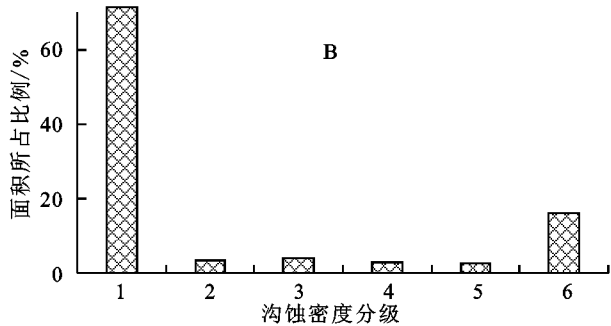


图 3 沟蚀密度分级所占面积比重

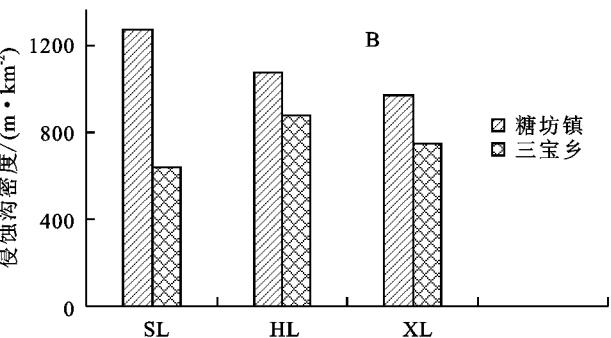
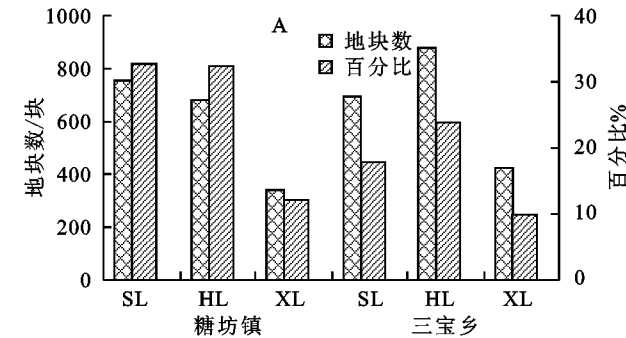


图 4 两乡镇不同垄向地块及沟蚀密度分布

3.3 耕作垄向分布空间自相关性

探讨耕作垄向空间自相关性可以直观了解耕作区垄向分布是规律性还是随机性。将两地 500 m×500 m 栅格格网分别与三种垄向地块数据叠加,统计每个格网内垄向地块面积百分比,然后利用 ArcGIS 9.3 Spatial autocorrelation analysis 模块进行垄向地块数据全局空间自相关分析,得到表 1 中 Moran's I 指数和 Z score 得分。

由表 1 可知,糖坊镇斜垄 Moran's I 达到 0.11, Z score 得分值为 7.36,空间自相关性最强。横垄 Moran's I 同样达到 0.11, Z score 得分值为 6.94。顺垄 Moran's I 为 0.09, Z score 得分值为 4.14。垄向空间自相关性表现为斜垄>横垄>顺垄,结合图 4B,三种垄向耕地沟蚀密度大小为顺垄>横垄>斜

垄,说明糖坊镇垄向的空间分布对抵御侵蚀沟产生起到了正面作用。

表 1 研究区耕地垄向地块全局自相关结果

乡镇	垄向	Moran's I	Z
糖坊镇	SL	0.09**	4.14
	HL	0.11**	6.94
	XL	0.11**	7.36
三宝乡	SL	0.09**	4.58
	HL	0.10**	7.06
	XL	0.09**	4.14

注:\*\*表示在 0.01 显著性水平下有差异。

三宝乡横垄 Moran's I 达到 0.1, Z score 得分值为 7.06,空间自相关性最强。说明三宝乡在某一地形条件下主要以横垄耕作抵抗地形劣势,但结合图 4B 三宝乡横垄沟蚀密度最大,横垄不能够很好抵御侵蚀沟的产生。顺垄 Moran's I 达到 0.09, Z score

得分值为 4.58,斜垄 Moran's  $I$  达到 0.09, $Z$  score 得分值为 4.14。垄向空间自相关性表现为横垄>顺垄>斜垄,而沟蚀密度表现为横垄>斜垄>顺垄,说明三宝乡这种垄向空间分布较不理想。

两乡镇无论何种垄向的空间自相关均达到极显著(Sig. <0.01)水平。已有研究表明<sup>[2]</sup>,地形是在特定土壤与耕作条件下影响耕作侵蚀的唯一因素,因此可以说,不同垄向在空间上的集聚是农民根据耕作经验对地形条件的反馈。根据实地调研,三宝乡有 50.66% 农民横垄耕作,与早期大规模“顺改横”有直

接关系<sup>[9]</sup>。垄向作为一种耕作条件,既是抵御地形劣势的反馈结果,又是特定地形条件助力产生沟蚀的原因,其与地形的复杂关系需要深入研究。

3.4 三种垄向耕地沟蚀与地形因子耦合关系

3.4.1 海拔因子 糖坊镇耕地平均海拔 146 m,三宝乡耕地平均海拔 210 m,两地海拔差异较大。为更好刻画三种垄向耕地沟蚀密度随海拔分异情况,将海拔分为 9 级,分别为 0~110,110~130,⋯,230~250,>250 m。依次把垄向、海拔级、侵蚀沟数据空间叠加得到不同垄向不同海拔级的沟蚀密度。

表 2 海拔分级

海拔分级	1	2	3	4	5	6	7	8	9
海拔/m	0~110	110~130	130~150	150~170	170~190	190~210	210~230	230~250	>250

由图 5A 可知,糖坊镇在 1 级海拔上沟蚀密度顺垄>斜垄>横垄。1—2 级海拔,横垄、顺垄沟蚀密度增长较大,斜垄沟蚀密度稍有回落,2 级海拔表现为顺垄>横垄>斜垄。2—3 级海拔,三种垄向沟蚀密度均随海拔增加至峰值,3 级海拔表现为横垄>顺垄>斜垄。3—5 级海拔,横、顺垄沟蚀密度下降速度快于斜垄,5 级海拔表现为斜垄>横垄>顺垄。5—6 级海拔,横、顺垄沟蚀密度小范围上升,斜垄沟蚀密度大幅降低,至 6 级海拔表现为横垄>顺垄>斜垄。6—9

级海拔,横垄、顺垄沟蚀密度波动下降至最低,斜垄沟蚀密度持续增加,9 级海拔表现为斜垄大于横垄和顺垄。能够说明,糖坊镇>210 m 海拔上以斜垄耕作为主,但不能很好抵御侵蚀沟产生。

综合来看,糖坊镇 0~150 m 小海拔范围及 190~210 m 海拔斜垄耕作能够降低沟蚀密度,150~190 m 海拔顺垄耕作最优,>210 m 海拔横垄耕作最优。130~150 m 海拔为三种垄向侵蚀敏感区间,应注意重点防治。

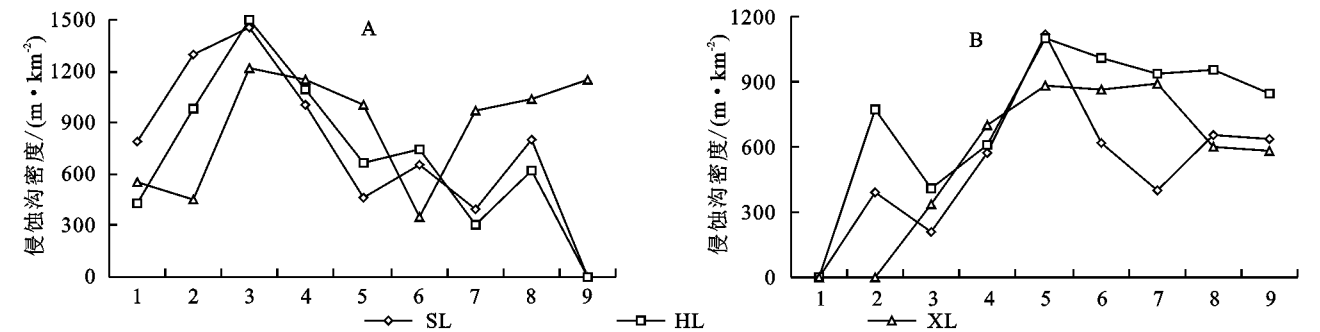


图 5 三种垄向沟蚀密度高程分异

由图 5B 可以看出,三宝乡不同垄向沟蚀密度均随海拔先增加后减小,这种规律和闫业超等研究相似<sup>[11,19]</sup>。1 级海拔耕地无侵蚀现象,2 级海拔斜垄沟蚀密度为 0,横垄沟蚀密度大于顺垄沟蚀密度。2—3 级坡长,横垄、顺垄沟蚀密度有所下降,斜垄沟蚀密度开始上升,至 3 级海拔表现为横垄>斜垄>顺垄。3—5 级海拔,三种垄向耕地沟蚀密度均随海拔增加至峰值,至 5 级海拔,表现为顺垄>横垄>斜垄。5—9 级海拔,三种垄向耕地沟蚀密度均随海拔升高而下降,至 9 级海拔表现为横垄>顺垄>斜垄。

综合来看,除糖坊镇斜垄外,各垄向沟蚀密度整体上随海拔高度呈现先增加后减小的趋势,不同高程受人类活动影响不同,环境脆弱程度也不同<sup>[19]</sup>。三宝乡顺垄沟蚀密度总体最低,与顺垄地块较少有关。

由于三宝乡“顺改横”特定原因,顺垄耕作不是三宝乡优势耕作垄向,斜垄耕作总体上为任意海拔级最优选择。170~190 m 是沟蚀敏感区,应注意防治。

3.4.2 坡度因子 将坡度数据重分类为 5 级,坡度分级见表 3。依次把垄向、坡度级、侵蚀沟数据空间叠加得到不同垄向不同坡度级的沟蚀密度。由图 6 看出,两乡镇沟蚀密度随坡度变化情况不完全相似,但占主导地位垄向的沟蚀密度随着坡度的增加都呈现先升高后下降的趋势。

由图 6A 看出,糖坊镇在 1 级坡度上沟蚀密度顺垄>横垄>斜垄。1—2 级坡度,顺、斜垄沟蚀密度随坡度上升,横垄沟蚀密度稍有减小,2 级坡度表现为顺垄>斜垄>横垄。2—3 级坡度,横顺垄沟蚀密度随坡度上升,斜垄沟蚀密度有所回落,顺垄沟蚀密度

达到峰值,为 1 345.30 m/km<sup>2</sup>,3 级坡度表现为顺垄>横垄>斜垄。3 级坡度后,顺垄沟蚀密度随坡度下降,横垄沟蚀密度随坡度持续上升,斜垄沟蚀密度波动下降,一直表现为横垄>顺垄>斜垄。8°以后,横垄沟蚀密度依然增加,比同坡度顺垄沟蚀密度大。

综合来看,在<6°时坡度是顺垄沟蚀的主要因素。2°~6°坡度范围横垄耕作能够更好抑制沟蚀,低坡度内由于流水方向与横垄垄向垂直,径流受到地垄

阻力,侵蚀沟短期内不会急速延伸,8°以后不再适宜横垄耕种。斜垄沟蚀密度在不同坡度级上表现平稳,整体小于横、顺垄沟蚀密度。斜垄耕作能够减小垄向角,使径流沿着更平缓坡度流动,侵蚀量更小<sup>[13]</sup>。

表 3 坡度分级

坡度分级	1	2	3	4	5
坡度	2°~4°	4°~6°	6°~8°	8°~10°	>10°

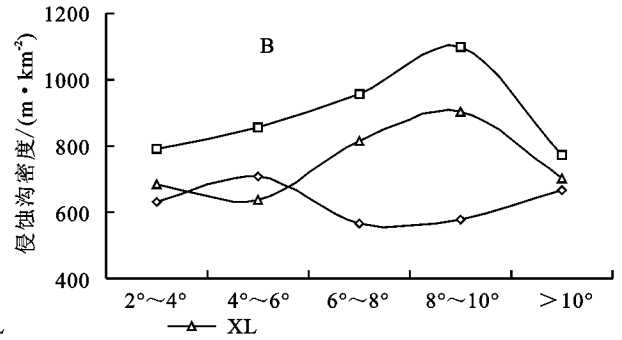
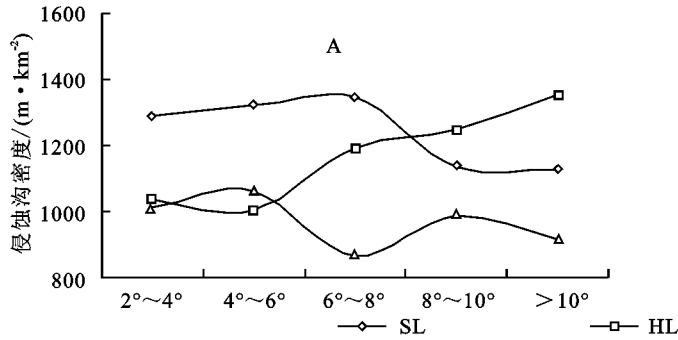


图 6 三种垄向沟蚀密度坡度分异

由图 6B 可知,三宝乡在第 1 坡度级上,沟蚀密度横垄>斜垄>顺垄。1—2 级坡度,横、顺垄沟蚀密度随坡度上升,斜垄沟蚀密度有所下降,2 级坡度表现为横垄>顺垄>斜垄。2—4 级坡度,横垄、斜垄沟蚀密度随坡度上升明显,至第 4 级坡度,表现为横垄>斜垄>顺垄,横、斜垄沟蚀密度达到峰值。4—5 级坡度,横、斜垄沟蚀密度自峰值回落,顺垄沟蚀密度呈上升趋势,第 5 坡度级上为横垄>斜垄>顺垄。

综合来看,三宝乡顺垄沟蚀密度最低,这与早期“顺改横”密不可分<sup>[9]</sup>,顺垄侵蚀早期本身就引发大规模侵蚀沟产生,所以三宝乡应斜垄耕作,8°~10°坡度

侵蚀沟重点防治。横垄沟蚀密度在各坡度级下均为最大,在实际耕作中,横垄耕作并不完全是等高耕作,每条横垄沟中高低不平,易造成渠系效应,很难达到水土保持目的<sup>[14]</sup>。

3.4.3 坡长因子 将坡长数据分级,与垄向、侵蚀沟数据叠加,得到不同垄向不同坡长级的沟蚀密度。糖坊镇耕地平均坡长 402.41 m,三宝乡耕地平均坡长 452.80 m。同分为 7 级,分别为 0~100,100~200, ..., >600 m(表 4)。一般来说,坡长越长汇水下流动力越大,剥蚀坡面时间越长,因而径流切割坡面作用越明显<sup>[7]</sup>。

表 4 坡长分级

坡长分级	1	2	3	4	5	6	7
坡长/m	0~100	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600	>600

对于糖坊镇,坡长对沟蚀密度作用显著,三种垄向沟蚀密度均随坡长增加而升高。由图 7 可知,1 级坡长,沟蚀密度表现为斜垄>顺垄>横垄。1—2 级坡长,横、顺垄沟蚀密度略有上升,至 2 级坡长表现为顺垄>斜垄>横垄。2—4 级坡长,横垄沟蚀密度随坡长增加而上升,顺垄沟蚀密度稳定增加,斜垄沟蚀密度较平稳,至 4 级坡长,沟蚀密度表现为横垄>顺垄>斜垄。4—6 级坡长,顺垄沟蚀密度持续随坡长增加而上升,横、斜垄沟蚀密度随坡长增加有所减小,至 6 级坡长,表现为顺垄>横垄>斜垄。6—7 级坡长,三种垄向沟蚀密度均急剧升高。径流冲刷力大小主要取决于径流速度和径流量,两者又受坡度和坡长影响<sup>[7]</sup>。

研究发现,糖坊镇坡长与坡度存在显著正线性关系( $R^2=0.8729$ ),从另一方面助力坡长,增强径流汇

流动力,造成沟蚀密度增加。坡长和坡度线性关系表达式为:

$$y=0.0015x+5.5176$$

$$(\text{Sig.}=0.00, R^2=0.8729) \quad (3)$$

顺垄沟蚀密度在坡度和坡长正向主导下,持续稳定增长,横垄沟蚀密度持波动增长态势。1—6 级坡长斜垄沟蚀密度平稳,同样由于斜垄能够减小垄向角,降低坡长对径流的影响,使水流沿平缓坡度移动以减小径流携带的动能。

综合来看,在糖坊镇 0~200 m 坡长,横垄耕作在三种垄向中沟蚀密度最低。200~600 m 坡长,斜垄受坡长干扰程度最小,受坡长坡度作用不显著。>600 m 坡长为耕作临界点,三种垄向均不宜耕作。

坡长对三宝乡横垄侵蚀作用显著。由图 8 可知,

1级坡长,沟蚀密度表现为斜垄>横垄>顺垄。1—2级坡长,横垄沟蚀密度急剧增加,顺垄和斜垄沟蚀密度略有上升,至2级坡长表现为横垄>斜垄>顺垄。2—3级坡长,横垄沟蚀密度增幅减小,顺垄、斜垄沟蚀密度均有所下降,至3级坡长表现为横垄>斜垄>顺垄,横垄沟蚀密度达到峰值。3—6级坡长,横垄沟蚀密度随坡长增加持续降低,顺垄和斜垄沟蚀密度波动变化,至6级坡长表现为斜垄>横垄>顺垄。6—7级坡长,三种垄向耕地沟蚀密度均下降到最低值,至7级坡长表现为顺垄>斜垄>横垄。

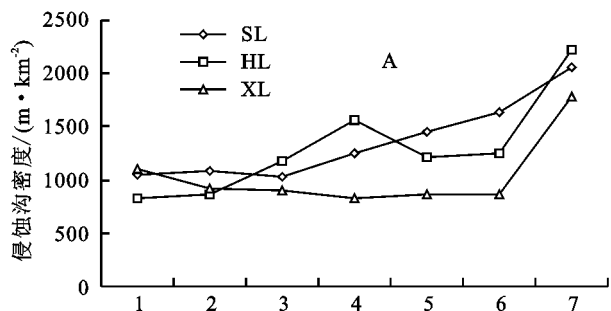


图7 糖坊镇三种垄向沟蚀密度坡长分异

三宝乡坡度和坡长关系呈显著负线性相关( $R^2=0.7682$ )。表达式为:

$$y = -0.0019x + 9.6826$$

$$(\text{Sig.} = 0.01, R^2 = 0.7682) \quad (4)$$

三种垄向沟蚀密度都在1—2级坡长上升,这主要因为1—2级长平均坡度从 $9.10^\circ$ 上升到 $9.56^\circ$ ,坡度增大了坡长内径流累积量。2级坡长后,平均坡度有所减小,由 $9.56^\circ$ 下降到 $7.92^\circ$ 。无论何种耕作垄向,坡度变缓后径流冲刷能力也会随之下降,降低了沟蚀密度。

总结来看,三宝乡0~600 m坡长适宜斜垄耕种。>600 m坡长耕地虽然坡长较大,但整体坡度较低,横垄耕作可以较好抵御侵蚀沟产生。200~300 m坡长,横垄侵蚀应重点防治。结合糖坊镇三种垄向耕地沟蚀密度随坡长分异规律及坡长坡度关系来看,“小坡长”+“小坡度”或“大坡长”+“小坡度”条件横垄耕作为最优选择,“小坡长”+“大坡度”或“大坡长+大坡度”条件斜垄耕作为最优选择。

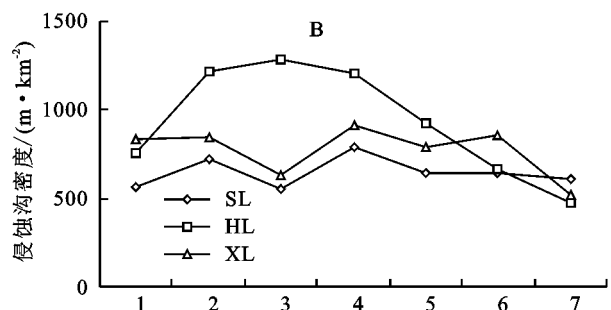


图8 三宝乡三种垄向沟蚀密度坡长分异

## 4 结论与讨论

(1) 本次研究的两个乡镇地形条件差异较大,耕作垄向分布不同,沟蚀空间集聚的程度也不相同。同时,占主导地位耕作垄向内的耕地侵蚀程度最重,不同垄向耕地的沟蚀密度有明显差异,说明耕作垄向的选择对耕地沟蚀的产生有一定影响。

(2) 研究区耕作垄向在空间上分布呈显著自相关关系( $\text{Sig.} < 0.01$ ),因为区域尺度下地形是空间上影响耕作侵蚀的唯一要素,因此能够说明不同耕作垄向在空间上的分布是农民根据耕作经验以水土保持效益为目的对地形条件的反馈体现,耕作垄向的合理配置能够起到降低沟蚀密度的作用。

(3) 对于海拔因子,除糖坊镇斜垄外,不同垄向耕地沟蚀密度随海拔先增大后减小。糖坊镇不同海拔区间优势耕作垄向规律性不强,130~150 m海拔为三种垄向侵蚀敏感区间。三宝乡斜垄耕作总体上为任何海拔级上最优选择。170~190 m海拔为三宝乡沟蚀敏感区。

(4) 对于坡度因子,占主导地位垄向耕地内的沟蚀密度先随坡度增加后减小,敏感区间分别是 $6^\circ \sim 8^\circ$ 及 $8^\circ \sim 10^\circ$ 。由于坡度、坡长因子分别是影响坡面径流速度和流量的主控因素,所以坡长因子与坡度因子的交互作用显著影响沟蚀密度。糖坊镇坡长与坡度正相关( $R^2=0.8729$ ),顺垄、横垄沟蚀密度在坡长坡度正相关作用下不断增加,斜垄沟蚀密度低于顺垄和横垄。耕地沟蚀密度>600 m坡长为耕作临界点。三宝乡坡长与坡度负相关( $R^2=0.7682$ ),横垄沟蚀密度在坡长坡度负相关作用下不断减小,顺、斜垄沟蚀密度变化不大。200~300 m坡长上,横垄侵蚀应重点防治。综合坡度、坡长的交互作用,两乡镇表现为“小坡长”+“小坡度”或“大坡长”+“小坡度”条件横垄耕作为最优选择,“小坡长”+“大坡度”或“大坡长+大坡度”条件斜垄耕作为最优选择。

根据本文研究,垄向既是抵御地形劣势的显性选择也是助力侵蚀沟发生的隐性条件,不同垄向的选择会对沟蚀有一定影响,斜垄耕作更具水土保持作用。单纯“顺改横”并不能有效抵御侵蚀,等高横垄耕作需要更精细措施,但在黑土区复杂地形条件下难于实现。此外,区域尺度下不同垄向耕地沟蚀与地形因子耦合规律需要因地分析,同时应注意不同地形因子的相互作用。对于沟蚀产生的地形敏感范围,应采取有效治沟防沟措施。耕作垄向与地形因子的复合作用是东北黑土区耕地产生侵蚀沟诱因,未来对于各耕作垄向分别干预或助力侵蚀沟产生的机理性原因与过程仍需更深层次探讨。

## 参考文献:

- [1] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
- [2] 王占礼.黄土坡地耕作侵蚀及其效应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2002.
- [3] Ndiaye B, Esteves M, Vandervaere J P, et al. Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil[J]. Journal of Hydrology, 2005, 307(1):294-311.
- [4] 王占礼,邵明安,雷廷武.黄土区耕作侵蚀及其对总土壤侵蚀贡献的空间格局[J].生态学报,2003,23(7):1328-1335.
- [5] 郭明明,王文龙,李建明.黄土区坡耕地耕作对浅沟径流产沙及其形态发育特征的影响[J].农业工程学报,2015,31(15):114-123.
- [6] 张兴昌.耕作及轮作对土壤氮素径流流失的影响[J].农业工程学报,2002,18(1):70-73.
- [7] 吴发启,张洪江.土壤侵蚀学[M].北京:科学出版社,2012.
- [8] 阎百兴,沈波,刘宝元.中国水土流失防治与生态安全[M].北京:科学出版社,2010.
- [9] 孟令钦,李勇.东北黑土区坡耕地沟蚀发育机理初探[J].水土保持学报,2009,23(1):7-11.
- [10] 刘元保,朱显谟,周佩华,等.黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988,7:9-18.
- [11] 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.
- [12] Álvarez-Mozos J, Campo M Á, Giménez R, et al. Implications of scale, slope, tillage operation and direction in the estimation of surface depression storage[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 111(2):142-153.
- [13] 赵玉明,姜洪涛,王世界.东北黑土区不同地形垄向坡度的相对水土保持效益研究[J].水土保持研究,2014,21(5):28-34.
- [14] 沈菡蒲,龚振平,温锦涛.横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研究[J].水土保持通报,2005,25(4):48-49.
- [15] 张秋华.不同耕作方式和植被覆盖对土壤养分流失的影响研究[J].现代农业,2014(2):18-21.
- [16] 张玉娟,王延亮,刘丹丹.土壤侵蚀时空动态分析:以黑龙江省宾县为例[J].测绘通报,2014(7):102-104.
- [17] 柳艺博.东北黑土区土壤侵蚀空间格局研究:以宾县马蛇子河流域为例[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 张琳.东北黑土区漫川漫岗区侵蚀沟评价指标体系[D].长春:东北师范大学,2013.
- [21] 闫业超,张树文,岳书平.近 40 a 黑土典型区坡沟侵蚀动态变化[J].农业工程学报,2010,26(2):109-115.
- [22] 田剑,汤国安,周毅,等.黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J].地理科学,2013,33(5):622-628.
- [23] 张朝生,陶澎,袁贵平,等.天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关研究[J].土壤学报,1995,32(1):50-57.
- [24] 宋萍,卞羽,洪伟,等.武夷山风景名胜区游客区域分布的空间自相关分析[J].热带地理,2008,28(3):283-287.
- [25] 高凤杰,雷国平,宋戈,等.牡丹江市退耕还林对区域土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持研究,2010,17(4):14-18.
- [26] 王文娟,张树文,方海燕.东北典型黑土区坡沟侵蚀耦合关系[J].自然资源学报,2012,27(12):2113-2122.

~~~~~  
(上接第 28 页)

- [5] 何锡君,吕振平,杨轩,等.浙江省降雨侵蚀力时空分布规律分析[J].水土保持研究,2010,17(6):31-34.
- [6] 刘正佳,刘占仁,王丝丝,等.基于日降雨的沂蒙山区降雨侵蚀力时空变化研究[J].水土保持研究,2012,19(2):34-38.
- [7] 张黎明,林金石,于东升,等.我国南方地区降雨侵蚀力指标  $R$  的建立研究:以江西鹰潭地区为例[J].水土保持研究,2011,18(5):1-4.
- [8] 段文明,穆兴民,王飞,等.嘉陵江流域降雨侵蚀力时空变化分析[J].水土保持通报,2012,32(5):182-185.
- [9] 刘春利,杨勤科,谢红霞.延河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].环境科学,2010,31(4):850-857.
- [10] 马良,姜广辉,左长清,等.江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J].农业工程学报,2009(10):61-68.
- [11] 吴昌广,林德生,肖文发,等.三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J].应用生态学报,2011,22(1):151-158.
- [12] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].地理研究,2013,32(2):245-256.
- [13] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等.珠江流域 1960—2012 年降雨侵蚀力时空变化特征[J].农业工程学报,2015,31(8):159-167.
- [14] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.基于重心模型的西南山区降雨侵蚀力年内变化分析[J].农业工程学报,2012,28(21):113-121.
- [15] 朱强,陈秀万,樊启祥,等.基于 TRMM 的降雨侵蚀力计算方法[J].中国科学:技术科学,2011,41(11):1483-1492.
- [16] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.
- [17] 穆兴民,戴海伦,高鹏,等.陕北黄土高原降雨侵蚀力时空变化研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(3):37-43.
- [18] 李良东,高鹏,穆兴民,等.辽河流域降雨侵蚀力时空变化分析[J].中国水土保持科学,2009,7(2):69-73.
- [19] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [20] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.