地边截水地物对黑土区小流域坡长因子计算的影响

尚晨晨[1,2]，张天宇[1,2]，秦丽杰[1,2]，韩 笑[3]

(1. 东北师范大学 长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室，吉林 长春 130024；
2. 东北师范大学 地理科学学院，吉林 长春 130024；3. 吉林农业大学 植物保护学院，吉林 长春 130118)

摘 要：[目的] 研究地边截水地物对黑土区小流域坡长因子(L)和土壤侵蚀速率(A)的影响，为提高该地区的土壤侵蚀预报精度提供依据。[方法] 选取 2 个小流域，结合野外调查和 DEM 分析，比较不考虑与考虑地边截水地物情况下的 L。[结果] 如果不考虑地边截水地物，L 平均被高估 18%，A 平均被高估 31%。[结论] 在计算黑土区小流域土壤侵蚀速率时，有必要考虑地边截水地物。在其他因素相同的情况下，坡度越大，横坡分布的地边截水地物的间距越小，越要考虑地边截水地物。

关键词：土壤侵蚀；坡长因子；沟道；黑土；林带

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2020)03-0305-05 **中图分类号**：S157

文献参数：尚晨晨，张天宇，秦丽杰，等. 地边截水地物对黑土区小流域坡长因子计算的影响[J]. 水土保持通报，2020，40(3)：305-309. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 03. 044；Shang Chenchen，Zhang Tianyu，Qin Lijie，et al. Effects of parcel-border features on slope length factor calculation of small watersheds in black soil region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(3)：305-309.

Effects of Parcel-Border Features on Slope Length Factor Calculation of Small Watersheds in Black Soil Region

Shang Chenchen[1]，Zhang Tianyu[1]，Qin Lijie[1]，Han Xiao[2]

(1. *Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security in Changbai Mountains，Ministry of Education，Northeast Normal University，Changchun，Jilin* 130024，*China*；2. *School of Geographical Sciences，Northeast Normal University，Changchun，Jilin* 130024，*China*；3. *School of Plant Protection，Jilin Agriculture University，Changchun，Jilin* 130118，*China*)

Abstract：[Objective] The effects of parcel-border features (PBFs) on the calculation of the slope length factor and soil erosion rate of small watersheds in a black soil region were studied in order to provide a basis to improve the precision of soil erosion prediction in the region. [Methods] Two typical small watersheds were selected. Field survey and digital elevation model analysis were used to calculate the slope length factor considering the PBF，and the PBF was ignored. [Results] The slope length factor could be overestimated by 18% and the soil erosion rate by 31%，on average. [Conclusion] It is necessary to consider PBFs for the slope length factor and soil erosion rate calculations of small watersheds in black soil region. Similarly，under other factors，it would be necessary to consider PBFs when the slope gradients are larger and the intervals between cross-slope PBFs are smaller.

Keywords：**soil erosion**；**slope length factor**；**channel**；**black soil**；**forest belt**

坡长是土壤侵蚀的重要影响因素。土壤侵蚀研究常涉及 2 种坡长。第 1 种是地形坡长(λ_D)。它是指径流从分水岭流到谷底所经过的水平距离。第 2 种是侵蚀坡长(λ)。它是指径流从起点到终点的水平距离。其中，起点指径流源点，终点指因坡度变小导致泥沙开始沉积的地点或径流汇入一个明显的沟道的地点[1-2]。地形坡长(λ_D)与侵蚀坡长(λ)有着本质区别。首先，地形坡长(λ_D)的起点是分水岭，侵蚀坡

收稿日期：2019-08-13 **修回日期**：2019-12-23

资助项目：国家重点基础研究发展计划项目“东北黑土区坡面水土流失综合治理技术”(2018YFC0507005)；国家自然科学基金项目“黑土和白浆土浅沟侵蚀土壤阻力参数季节变化研究”(41401304)，“吉林省农作物生产水足迹热点区识别及调控研究”(41571526)

第一作者：尚晨晨(1995—)，女(汉族)，山西省安泽县人，硕士研究生，研究方向为水资源与水环境。Email：shangcc947@nenu. edu. cn。

通讯作者：张天宇(1981—)，男(汉族)，吉林省吉林市人，博士，讲师，主要从事土壤侵蚀研究。Email：zhangty100@nenu. edu. cn。

长(λ)的起点是径流源点。前者不总是后者。例如,某小流域上部为林地,下部为耕地。林地保水能力较强,不产生径流。耕地保水能力较弱,产生径流。因此,径流源点位于林地和耕地的交界处,而不是分水岭。其次,地形坡长(λ_D)的终点是谷底,侵蚀坡长(λ)的终点则是沟道或泥沙开始沉积的地点。前者不总是后者。例如,坡面中部大致沿等高线方向有排水沟,导致上方来水直接汇入排水沟,此时径流的终点是排水沟,而不是谷底。再如,某小流域在坡中有植物篱,上方来水受植物篱阻挡发生泥沙沉积,则径流的终点位于植物篱,而不是谷底。综上,地形坡长(λ_D)不总是等于侵蚀坡长(λ),有时会大于侵蚀坡长(λ)。侵蚀坡长(λ)总是小于或等于地形坡长(λ_D)。

土壤侵蚀预报需要输入侵蚀坡长(λ)。准确的侵蚀坡长(λ)需要通过野外调查获得,工作量很大。因此,很多研究利用较为容易获取的数字高程模型(DEM)来计算侵蚀坡长(λ)[3-5]。流程一般是先用软件分析 DEM,获取径流的路径,再用每个栅格的汇流长度计算侵蚀坡长(λ)。然而,当 DEM 无法识别径流的源点和终点时,利用 DEM 得到的坡长其实并不是侵蚀坡长(λ),而是地形坡长(λ_D)。现实中大部分 DEM 确实无法识别径流的源点和终点。把利用这种 DEM 求得的地形坡长(λ_D)视为侵蚀坡长(λ),再计算坡长因子和土壤侵蚀速率,势必导致高估。这一问题在东北黑土区尤为突出。该地区地形以低缓的台地为主,俗称“漫岗”。漫岗的地形坡长(λ_D)多为 500～1 000 m[6]。一个漫岗坡面一般由几个地块组成。地块之间常有在 DEM 上无法识别的、足以截断侵蚀坡长(λ)的地物,包括林带、植物篱、排水沟和道路等。我们将其统称为“地边截水地物”。这些地物对黑土区小流域坡长因子计算会有多大的影响?这种影响又与哪些因素有关?均有待探讨。本研究旨在通过选取典型小流域,结合野外调查和 DEM 分析,初步揭示地边截水地物对黑土区小流域坡长因子计算的影响。以期为提高该地区的土壤侵蚀预报精度提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取了 2 个小流域,分别是苇子沟 1 号小流域和鹤北 3 号小流域。苇子沟 1 号小流域位于吉林省农安县万金塔乡(44.651°N,125.439°E),总面积为 4.0 km^2。气候为温带大陆性气候,年均气温 4.7 ℃,年均降水量 508 mm,多集中于 6—8 月份。地形为台地,高程介于 168～191 m,平均坡度为 0.24°。地势西北高,东南低。土壤主要是黑钙土,沟底部位为草甸土。黑钙土 A 层厚度一般在 30 cm 以上,有机质含量为 2.7%,黏粒、粉粒和砂粒的含量分别为 25%,35%和 40%(美国制),质地属于壤土。原始植被为森林草甸。开垦年限在 100 a 以上。当前土地利用以旱地为主,作物以玉米为主。鹤北 3 号小流域位于黑龙江省嫩江县鹤山农场(49.022°N,125.319°E),总面积为 2.3 km^2。气候为温带大陆性气候,年均气温 0.5 ℃,年均降水量 492 mm,多集中于 6～8 月份。地形为台地,高程介于 325～381 m,平均坡度为2.0°。地势西高东低。土壤主要是黑土,沟底部位为草甸土。黑土 A 层厚度一般在 30 cm 以下,有机质含量为 4.2%,黏粒、粉粒和砂粒的含量分别为 39%,38%和 23%(美国制),质地属于粘壤土。原始植被为森林草甸。开垦年限约 50 a。当前土地利用以旱地为主,作物以大豆和玉米为主。

1.2 地边截水地物调查

通过野外调查获取地边截水地物的位置。调查方法参照区域沟蚀野外调查方法[7]。首先,在研究区布设行走线路。行走线路大致平行于等高线,间距不超过 200 m。其次,两人一组沿着行走路线行走,同时目视搜索地边截水地物。发现后用 GPS 记录位置。最后,将它们绘到地图上,用它们将小流域分割成若干地块。

1.3 坡长和坡长因子计算

1.3.1 *地形坡长(λ_D)和地形坡长因子(L_D)* 首先,DEM 的原始数据为 1∶1 万地形图。利用 ArcGIS 的 Topo to Raster 工具转为 10 m 分辨率的 DEM。其次,利用杨勤科和张宏鸣设计开发的 LS 计算工具计算地形坡长(λ_D)[8]。再次,利用公式(1)计算坡长因子。

$$L_i = \left(\frac{\lambda_i}{22.1}\right)^m \tag{1}$$

式中:L_i 为第 i 段坡长因子,无量纲;λ_i 为第 i 段坡长(m);m 为可变的坡长指数,θ 为地面坡度。$\theta \leqslant 1°$ 时,m 取 0.2;当 $1° < \theta \leqslant 3°$ 时,m 取 0.3;当 $3° < \theta \leqslant 5°$ 时,m 取 0.4;当 $\theta > 5°$ 时,m 取 0.5。以上方法获得的坡长为 λ_D,坡长因子为 L_D。

1.3.2 *侵蚀坡长(λ)和侵蚀坡长因子(L)* 侵蚀坡长(λ)的计算方法与地形坡长(λ_D)的基本一致。不同的是计算地形坡长(λ_D)时输入的是整个小流域的 DEM,计算侵蚀坡长(λ)时输入的是单个地块的 DEM。这些地块由地边截水地物分割而成。

1.4 土壤侵蚀速率计算

利用中国土壤流失方程计算土壤侵蚀速率[9]。

其形式为:

$$M=R\cdot K\cdot L\cdot S\cdot B\cdot E\cdot T \quad (2)$$

式中:M 为土壤侵蚀模数,t/(hm^2 · a);R 为降雨侵蚀力因子,MJ · mm/(hm^2 · h · a);K 为土壤可蚀性因子,t · hm^2 · h/(hm^2 · MJ · mm);L 和 S 分别为坡长和坡度因子,无量纲。B,E,T 为措施因子,分别对应生物措施、工程措施和耕作措施,无量纲。R 采用日降水数据和 Xie 等[10]提出的公式计算。降水数据来自中国气象数据网,时段为 1981 年—2010 年。苇子沟 1 号小流域参考农安站。鹤北 3 号小流域参考嫩江站。K 采用径流小区法或公式法计算。鹤北 3 号小流域的 K 参考当地径流小区的观测值,取 0.037 5[11]。苇子沟 1 号小流域缺少径流小区观测,因而采用公式法计算。首先,从坡顶到坡下采集 3 个土样。用重铬酸钾氧化法测定土壤有机质含量。用吸管法测定土壤机械组成。用 Wischmeier 公式计算 K[1]。其中,结构系数和渗透系数根据前人经验取值,分别取 2 和 3[1]。取 3 个土样 K 的平均值作为小流域的 K。S 采用刘宝元等提出的公式计算。L 采用公式(1)计算。B 参照东北地区径流小区资料取值,取 0.4[12-13]。研究区耕地中没有工程措施,因此 E 取 1。T 根据东北地区径流小区资料和研究区垄向情况确定。顺坡种植的 T 值为 1,等高沟垅种植的 T 值约为 0.2[13-14]。研究区内没有严格的顺坡种植和等高沟垅种植,垄向大多介于二者之间,因此 T 取 0.6。最后,取土壤容重为 1.35 g/cm^3,将计算结果 M 转成土壤侵蚀速率(A),mm/a。

2　结果与分析

2.1　地边截水地物的数量与分布

苇子沟 1 号小流域的地边截水地物全部为排水沟。共有 7 条排水沟,均为人为挖掘。除排水以外,这些排水沟还用来划分地界和防止树根胁地。所有排水沟都伴有道路。排水沟的一些部位在流水冲刷作用下发生了扩张。鹤北 3 号小流域的地边截水地物为林带和道路。共有 8 条林带。这些林带属于农田防护林,种植于 1970 和 1980 年代,长度多在 1 km 上,宽度为 10 m 左右。树种主要是落叶松、杨树和樟子松。林下草本植物生长旺盛,覆盖度接近 100%。林带下方土壤侵蚀较弱,林带两侧耕地土壤侵蚀较强。几十年的差异侵蚀导致林带地面高出耕地地面,形成土埂。径流在穿过林带时会被土埂和草本植物拦截,发生泥沙沉积。

2.2　地形坡长(λ_D)与侵蚀坡长(λ)的差异

苇子沟 1 号小流域地形坡长(λ_D)介于 10～5 406 m,平均值为 619 m(见表 1)。侵蚀坡长(λ)介于 10～1 592 m,平均值为 269 m。地形坡长(λ_D)总是大于或等于侵蚀坡长(λ),地形坡长(λ_D)平均值比侵蚀坡长(λ)平均值高出 130%(表 1)。在分布上,地形坡长(λ_D)更向右(高值)偏,侵蚀坡长(λ)更向左(低值)偏(见图 1)。在 0～500 m 区间上,侵蚀坡长(λ)的比例比地形坡长(λ_D)的比例高出 28%。在 500～700 m 区间上,侵蚀坡长(λ)的比例和地形坡长(λ_D)的比例接近。在>700 m 区间上,侵蚀坡长(λ)的比例比地形坡长(λ_D)的比例低 25%。这些差异是排水沟对坡长的截断作用造成的。

表 1　用地形坡长(λ_D)和侵蚀坡长(λ)求得的小流域平均坡长因子和土壤侵蚀速率

流域坡长	苇子沟 1 号		鹤北 3 号	
	地形坡长(λ_D)	侵蚀坡长(λ)	地形坡长(λ_D)	侵蚀坡长(λ)
坡长因子	1.77	1.55	1.79	1.49
侵蚀速率/(mm · a^{-1})	0.20	0.15	0.70	0.57

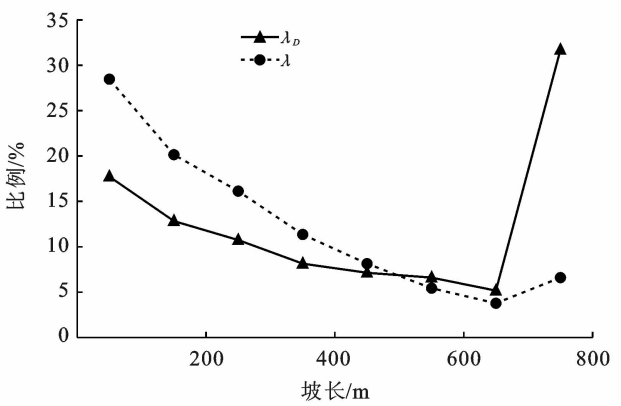


图 1　苇子沟 1 号小流域地形坡长(λ_D)和侵蚀坡长(λ)的分布特征

鹤北 3 号小流域地形坡长(λ_D)介于 10～2 864 m,平均值为 217 m(见表 1)。侵蚀坡长(λ)介于 10～2 175 m,平均值为 120 m。地形坡长(λ_D)总是大于或等于侵蚀坡长(λ),地形坡长(λ_D)平均值比侵蚀坡长(λ)平均值高出 81%(表 1)。在分布上,地形坡长(λ_D)更向右(高值)偏,侵蚀坡长(λ)更向左(低值)偏(见图 2)。在 0～100 m 区间上,侵蚀坡长(λ)的比例比地形坡长(λ_D)的比例高 20%。在 100～200 m 区间上,侵蚀坡长(λ)的比例和地形坡长(λ_D)的比例相当,前者略高出 4%。在>200 m 区间上,侵蚀坡长(λ)的比例比地形坡长(λ_D)的比例低 24%。这些差异是林带和道路对坡长的截断作用造成的。

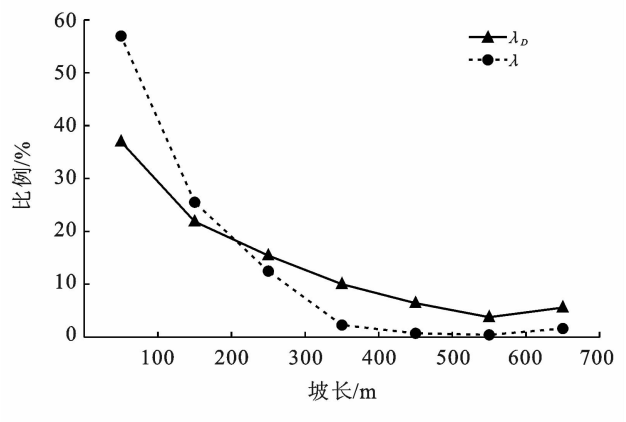


图 2 鹤北 3 号小流域地形坡长(λ_D)和侵蚀坡长(λ)的分布

2.3 地形坡长因子(L_D)与侵蚀坡长因子(L)的差异

苇子沟 1 号小流域地形坡长因子(L_D)介于 0.78～5.16,平均值为 1.77。侵蚀坡长因子(L)介于0.78～3.01,平均值为 1.55(见表 1)。地形坡长因子(L_D)总是大于或等于侵蚀坡长因子(L),地形坡长因子(L_D)平均值比侵蚀坡长因子(L)平均值高出 14%。在分布上,地形坡长因子(L_D)更向右(高值)偏,侵蚀坡长因子(L)更向左(低值)偏(见图 3)。

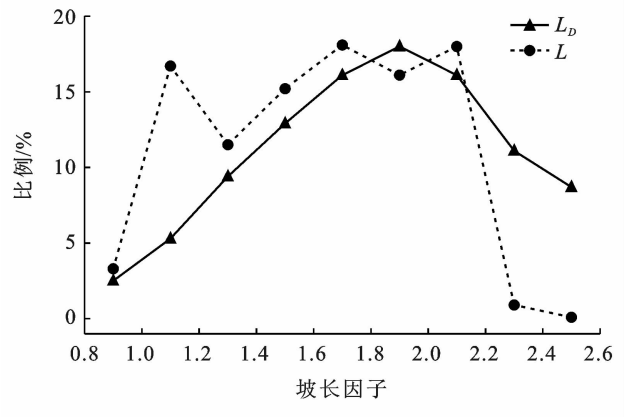


图 3 苇子沟 1 号小流域地形坡长因子(L_D)和侵蚀坡长因子(L)的分布

在 0～1.8 区间上,侵蚀坡长因子(L)的比例比地形坡长因子(L_D)的比例高出 17%。在 1.8～2.2 区间上,侵蚀坡长因子(L)的比例和地形坡长因子(L_D)的比例接近。在>2.2 区间上,侵蚀坡长因子(L)的比例比地形坡长因子(L_D)的比例低 19%。这些差异是排水沟对坡长的截断作用造成的。

鹤北 3 号小流域地形坡长因子(L_D)介于 0.78～4.30,平均值为 1.79。侵蚀坡长因子(L)介于 0.78～3.96,平均值为 1.49(见表 1)。地形坡长因子(L_D)总是大于或等于侵蚀坡长因子(L),地形坡长因子(L_D)平均值比侵蚀坡长因子(L)平均值高出 21%。在分布上,地形坡长因子(L_D)更向右(高值)偏,侵蚀坡长因子(L)更向左(低值)偏(见图 4)。在 0～1.9 区间上,侵蚀坡长因子(L)的比例比地形坡长因子(L_D)的比例高出 21%。在 1.4～1.6 区间上,侵蚀坡长因子(L)的比例和地形坡长因子(L_D)的比例相当。在>1.9 区间上,侵蚀坡长因子(L)的比例比地形坡长因子(L_D)的比例低 24%。这些差异是林带对坡长的截断作用造成的。

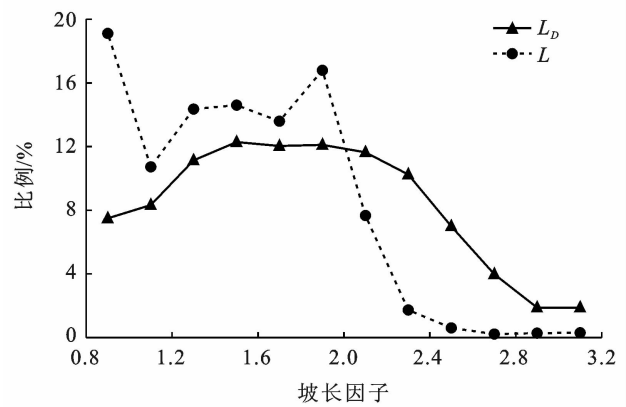


图 4 鹤北 3 号小流域地形坡长因子(L_D)和侵蚀坡长因子(L)的分布

2.4 土壤侵蚀速率的差异

使用地形坡长(λ_D)和侵蚀坡长(λ)计算,苇子沟 1 号小流域的平均土壤侵蚀速率分别为 0.20 mm/a 和 0.15 mm/a,鹤北 3 号小流域的平均土壤侵蚀速率分别为 0.70 mm/a 和 0.57 mm/a(见表 2)。换言之,如果使用地形坡长(λ_D)计算,2 个小流域的土壤侵蚀速率分别被高估 37%和 24%。2 个小流域的土壤侵蚀速率均超过了黑土的容许土壤流失量(141 t/hm^2,约 0.1 mm/a)[15]。

表 2 土壤流失方程各因子值和土壤侵蚀速率

小流域	R	K	L	S	B	E	T	侵蚀速率/(mm·a^{-1})
苇子沟 1 号	1617	0.049	1.55	0.06	0.4	1	0.6	0.15
鹤北 3 号	1311	0.034	1.49	0.36	0.4	1	0.6	0.57

注:R 为降雨侵蚀力因子;K 为土壤可蚀性因子;L 为坡长因子;S 为坡度因子;B 为生物措施因子;E 为工程措施因子;T 为耕作措施因子。

3　讨　论

地边截水地物可以截断坡长。但由于它们的尺寸很小,很难在 DEM 上识别。例如,苇子沟 1 号小流域的排水沟宽度一般不超过 2 m,深度一般不超过 1 m。鹤北 3 号小流域的林带宽度一般在 10 m 左右,林下土埂的高度一般不超过 0.2 m。这些地物即使在 1∶10 000 地形图上也无法识别。在此情况下,直接使用小流域 DEM 计算,将地形坡长(λ_D)视为侵蚀坡长(λ),势必导致高估坡长因子和土壤侵蚀速率。结果显示,苇子沟 1 号小流域坡长、坡长因子和土壤侵蚀速率的均值分别被高估了 130%,14%和 37%。鹤北 3 号小流域坡长、坡长因子和土壤侵蚀速率的均值分别被高估了 81%,21%和 24%。因此,在计算黑土区小流域土壤侵蚀速率时,有必要考虑地边截水地物的影响。

坡长因子被高估的程度与地面坡度(θ)和横坡分布的地边截水地物的间距(D)有关。首先,地面坡度(θ)影响到公式(1)中的可变的坡长指数(m),进而影响坡长因子。现实中,苇子沟 1 号小流域的坡长指数(m)主要为 0.2,鹤北 3 号小流域的坡长指数(m)主要为 0.3。为进行比较。我们计算了坡长指数(m)为 0.2,0.3,0.4 和 0.5 情况下坡长因子被高估的程度。它们对应着 $\theta<1°$,$1°\leqslant\theta<3°$,$3°\leqslant\theta<5°$和 $\theta\geqslant5°$等 4 种情况。结果显示,当坡长指数(m)分别为 0.2,0.3,0.4 和 0.5 时,苇子沟 1 号小流域侵蚀坡长因子(L)平均值分别被高估 15%,24%,35%和 46%,鹤北 3 号小流域侵蚀坡长因子(L)平均值分别被高估 11%,19%,26%和 34%(见表 3—4)。

表 3　不同坡长指数(m)下苇子沟 1 号小流域的地形坡长因子(L_D)和侵蚀坡长因子(L)

m	0.2	0.3	0.4	0.5
L_D	1.39	1.66	2.01	2.45
L	1.54	1.94	2.46	3.16
高估程度/%	15	24	35	46

表 4　不同坡长指数(m)下鹤北 3 号小流域的地形坡长因子(L_D)和侵蚀坡长因子(L)

m	0.2	0.3	0.4	0.5
L_D	1.46	1.80	2.23	2.80
L	1.31	1.51	1.77	2.09
高估程度/%	11	19	26	34

如表 3—4 所示,坡长因子被高估的程度与坡长指数(m)呈正相关。这意味着在其他因素相同的情况下,坡度越大,越要考虑地边截水地物的影响。其次,地边截水地物的间距(D)影响到坡长被截断的强度,进而影响到坡长因子被高估的程度。现实中苇子沟 1 号小流域地边截水地物的间距(D)大概为 800 m。为进行比较,我们计算了地边截水地物的间距(D)为 500,250 m 情况下的坡长因子。现实中鹤北 3 号小流域地边截水地物的间距(D)大概为 200 m。为进行比较,我们计算了地边截水地物的间距(D)为 100,50 m的情况下的坡长因子。结果显示,当地边截水地物的间距(D)分别为 800,500,250 m 的情况下,苇子沟 1 号小流域侵蚀坡长因子(L)平均值分别被高估 14%,68%和 70%。当地边截水地物的间距(D)分别为 200,100 ,50 m 的情况下,鹤北 3 号小流域侵蚀坡长因子(L)平均值分别被高估 21%,27%和 33%。因此,在其他因素相同的情况下,地边截水地物的间距(D)越小,越要考虑地边截水地物的影响。

东北黑土区是中国粮食安全的“稳压器”和“压舱石”。土壤侵蚀是东北黑土区粮食生产面临的主要威胁之一。对东北黑土区未来粮食产量的准确判断有赖于对土壤侵蚀速率的准确判断。本文结果显示,地边截水地物对东北黑土区土壤侵蚀速率有着重要影响。如果不考虑这种影响,坡长因子和土壤侵蚀速率平均被高估 18%和 31%。这是本文最重要的发现。然而,本文只选取了 2 个小流域作为研究区。东北黑土区面积广大,地势起伏与地块形状的搭配模式复杂多样,地边截水地物对坡长因子和土壤侵蚀速率的影响模式和强度也复杂多样。本文的结果只是一个初步认识。今后还需结合抽样调查和土壤侵蚀示踪元素法等手段,进一步查明地边截水地物对坡长因子和土壤侵蚀速率的影响。

4　结　论

(1) 地边截水地物可以截断坡长,影响到土壤侵蚀的坡长因子,进而影响土壤侵蚀速率。对于黑土区小流域,如果不考虑地边截水地物的影响,坡长因子可以被高估 21%,土壤侵蚀速率可以被高估 106%。在计算黑土区小流域土壤侵蚀速率时,有必要考虑地边截水地物的影响。

(2) 在其他因素相同的情况下,坡度越大,横坡分布的地边截水地物的间距越小,越要考虑地边截水地物的影响。

[参　考　文　献]

[1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1978.

(下转第 316 页)

[9] 娄现勇,高建恩,韩赛奇,等.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程对流域产汇流的影响[J].水电能源科学,2016,34(10):23-27.

[10] 娄现勇.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治小流域控制工程设计标准研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.

[11] 徐彬冰,虞红兵,李丽,等.沿海土地整治区地下排水模式设计研究[J].灌溉排水学报,2018,37(S1):175-179.

[12] Radu O. Water excess drainage during operations on agricultural land fitted with drainage-draining works in the catchment area of Moldova River, Suceava County [J]. Research Journal of Agricultural Science, 2013,45(2):210-220.

[13] 李会贞,李法虎,周新国,等.农田暗管-明沟组合排水系统布设参数计算与设计软件编程[J].灌溉排水学报,2018,37(6):101-108.

[14] 刘丽萍.黄土沟壑区路基防排水技术研究[D].西安:长安大学,2006.

[15] 傅伯杰,陈利顶,马克明.黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响:以延安市羊圈沟流域为例[J].地理学报,1999,54(3):241-246.

[16] 李鑫.不同粒径均值碎石的渗透特性研究[D].太原:太原理工大学,2016.

[17] 孙鹏旭.碎石盲沟在中条山隧道中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(3):287-288.

[18] 蒋定生,黄国俊.黄土高原土壤入渗速率的研究[J].土壤学报,1986,23(4):299-305.

[19] 毛建华,张翼,刘世伟,等.延安地区实用水文手册[M].陕西:陕西省水利水土保持厅,1987:153-156.

[20] 吴显,汪磊,孙红月.斜孔虹吸排水管内泥沙起动流速方程的推导及应用[J].自然灾害学报,2018,27(5):54-62.

[21] 韩其为,王玉成,向熙珑.淤积物的初期干容重[J].泥沙研究,1981(1):1-13.

[22] Carman P C. Permeability of saturated sands, soils and clays[J]. The Journal of Agricultural Science, 1939,29(2):262-273.

[23] 孙宇瑞.土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J].中国农业大学学报,2000,5(4):39-41.

(上接第 309 页)

[2] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1997.

[3] Amore E, Modica C, Nearing M A, et al. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins [J]. Journal of Hydrology, 2004,293(1/2/3/4): 100-114.

[4] Fu Guobin, Chen Shulin, McCool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS [J]. Soil and Tillage Research, 2006,85(1/2):38-49.

[5] Pandey A, Chowdary V M, Mal B C. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing [J]. Water Resources Management, 2007,21(4):729-746.

[6] 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.

[7] 刘宝元,刘刚,王大安,等.区域沟蚀野外调查方法:以东北地区为例[J].中国水土保持科学,2018,16(4):34-40.

[8] Zhang Hongming, Wei Jicheng, Yang Qinke, et al. An improved method for calculating slope length (λ) and the *LS* parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds [J]. Geoderma, 2017, 308: 36-45.

[9] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation [C]// Proceedings-Process of soil erosion and its environment effect, 12th international soil conservation organization conference, Tsinghua University Press, Beijing, 2002:21-25.

[10] Xie Yun, Yin Shuiqing, Liu Baoyuan, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China [J]. Journal of Hydrology, 2016,535:547-558.

[11] 杨欣,郭乾坤,王爱娟,等.基于小区实测数据的不同类型土壤可蚀性因子计算[J].水土保持通报,2019,39(4):114-119.

[12] 林素兰,黄毅,聂振刚,等.辽北低山丘陵区坡耕地土壤流失方程的建立[J].土壤通报,1997,28(6):251-253.

[13] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等.黑龙江省土壤流失方程的研究[J].水土保持通报,1992,12(4):1-9.

[14] 杨欣.基于小区实测资料的土壤侵蚀因子量化研究[D].北京:北京师范大学,2019.

[15] 谢云,段兴武,刘宝元,等.东北黑土区主要黑土土种的容许土壤流失量[J].地理学报,2011,66(7):940-952.