基于 RUSLE 模型的梅河口市土壤侵蚀动态分析

刘 盼[1,2], 任春颖[1], 王岩松[3], 刘建祥[3]

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 吉林, 130102;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 松辽水利委员会松辽流域水土保持监测中心站, 长春 吉林, 130021)

摘 要: [目的] 定量分析区域土壤侵蚀强度动态变化及其影响因素,为区域水土保持工作提供科学依据。[方法] 基于 3S 技术,采用 RUSLE 模型计算吉林省梅河口市 2010 年和 2017 年的土壤侵蚀模数,并从土地利用类型、坡度和水土保持措施 3 个方面分析土壤侵蚀变化特征。[结果] ①梅河口市 2010 年、2017 年的平均土壤侵蚀模数分别为 698.75,678.25 t/(km^2 · a),土壤侵蚀状况有所改善。②梅河口市的土壤侵蚀与坡度和土地利用有关,>95%的土壤侵蚀分布在坡度<15°坡地,土地利用以耕地和林地为主的区域。③2010—2017 年,水保项目实施区域的平均土壤侵蚀模数下降了 154.08 t/(km^2 · a),土壤侵蚀量减少了 2.65×10^4 t。[结论] 水保项目的实施在改善水土保持功能上取得较大的成效,但治理后的区域仍存在一定强度的侵蚀,且土地利用的不利转变加重了区域土壤侵蚀。因此,区域水土流失治理工作需考虑多部门协同,从源头上遏制发生水土流失的不利因素。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE; 3S 技术; 梅河口市

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2019)01-0172-08 **中图分类号**: S157.1, P237

文献参数: 刘盼, 任春颖, 王岩松, 等. 基于 RUSLE 模型的梅河口市土壤侵蚀动态分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 172-179. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.028; Liu Pan, Ren Chunying, Wang Yansong, et al. Dynamic analysis of soil erosion in Meihekou City based on RUSLE model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 172-179.

Dynamic Analysis of Soil Erosion in Meihekou City Based on RUSLE Model

Liu Pan[1,2], Ren Chunying[1], Wang Yansong[3], Liu Jianxiang[3]

(1. *Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130102, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *Soil and Water Conservation Monitoring Center, Song-Liao Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Changchun, Jilin* 130021, *China*)

Abstract: [Objective] To analyze the dynamic changes of regional soil erosion intensity and its driving factors, in order to provide scientific basis for regional soil and water conservation. [Methods] Based on 3S technology, the revised universal soil loss equation (RUSLE) was used to estimate soil erosion modulus of Meihekou City, Jilin Province in 2010 and 2017. The changes of soil erosion were analyzed according to land use, slope and soil and water conservation measures. [Results] ① The average soil erosion modulus in 2000 and 2017 were 698.75 and 678.25 t/(km^2 · a), respectively, indicating the improvement of soil and water conservation in Meihekou City. ② The soil erosion in Meihekou City was correlated with the slope and land use. More than 95% of the soil erosion area were distributed in areas with slope <15°, and the land use was mainly cultivated land and forest land. ③ From 2010 to 2017, the mean soil erosion modulus decreased by 154.08 t/(km^2 · a), and the amount of soil erosion decreased by 2.65× 10^4 t in the soil and water conservation project implementation area. [Conclusion] The implementation of soil and water conservation project have improved soil and water conservation functions dramatically, but soil erosion is still existing in the treated area,

收稿日期: 2018-07-05 **修回日期**: 2018-08-15
资助项目: 松辽流域水土保持业务项目"全国水土流失动态监测与公告"(1261520545001)
第一作者: 刘盼(1993—),女(汉族),重庆市巫山县人,硕士研究生,研究方向为资源环境遥感。E-mail: liupan_xhsfdx2012@163.com。
通讯作者: 任春颖(1980—),女(汉族),吉林省长春市人,博士,副研究员,主要从事土地资源遥感的研究。E-mail: renchy@iga.ac.cn。

and the improper transformation of land use type has aggravated regional soil erosion. Therefore, the cooperation works among different department need to be done to control the soil and water loss from the sources.

Keywords: soil erosion; revised universal soil loss equation; 3S technology; Meihekou City

东北黑土区是中国主要的粮食生产基地[1],也是东北地区重要的生态屏障。长期以来,自然因素和不合理的人类活动导致东北黑土区出现了侵蚀沟发育严重[2]、土层变薄[3]等水土流失问题,进而导致农业生产能力下降[1],阻碍了黑土区的农业生产和经济发展[1,3]。土壤侵蚀定量分析与评价是水土流失治理的前提,而掌握区域土壤侵蚀动态变化对评价该地区的水土保持治理效果、指导水土保持措施优化配置、水土资源的保护和可持续利用具有重要意义[4]。

土壤侵蚀定量评价方法有侵蚀模型法、数字高程法和核示踪法[5]。常用的侵蚀模型包括基于经验统计和基于物理过程的侵蚀模型两大类[5]。基于物理过程的侵蚀模型[6-7]通常需要输入大量参数,参数不易获得且输入参数的可变性会导致结果的不确定性增加。因此,基于物理的模型应用范围受到限制[8]。修正通用土壤流失方程(RUSLE)[9]是目前国内外应用最为广泛的一种经验模型,它具有模型结构简单、参数获取容易、计算快速等优点。该模型与 GIS/RS 技术相结合,可以实现栅格尺度土壤侵蚀模拟与预测,被广泛用于土壤侵蚀量估算[10-11]、动态变化分析[4]、土壤侵蚀空间分异特征分析[12]以及水土流失敏感性分析[13]等。基于 RUSLE 模型在东北黑土区的研究主要集中在流域尺度的土壤侵蚀及动态变化研究[14-16]。水土保持项目的实施以流域和县域尺度居多[17],而目前在东北黑土区开展的基于县域尺度的土壤侵蚀动态研究较少深入开展影响因素方面的分析。

吉林省梅河口市是国家农业综合开发黑土区水土流失重点治理项目县之一,截至 2017 年,水利部对该区域的水土流失进行了多年治理,治理措施是否有效、效果是否显著,是国家以及相关部门亟需了解的问题。本研究拟结合 3S 技术,运用 RUSLE 模型计算梅河口市 2010 年、2017 年的土壤侵蚀模数,并从土地利用类型、坡度和水土保持措施 3 个方面深入分析土壤侵蚀变化特征及其影响因素,以期为区域水土保持治理工作提供科学依据。

1　研究区概况

梅河口市位于吉林省东南部,地理位置为 42°08′—43°02′N,125°15′—126°03′E,面积 2 174.60 km^2。地形南北斜长、东西较窄。地势西南和东北两端稍高,中部较低,地面高程为 230～440 m。梅河口市属北温带大陆性季风气候,年平均气温为 4.6 ℃,年平均降水量为 708.3 mm。土壤类型主要有草甸土、白浆土、水稻土、冲积土、棕壤等。全市分为 3 个综合区域,西南地区种植多为旱地;中部平原是以水稻、玉米为主的粮食产区;东北部是以玉米、大豆为主的低山丘陵农牧经济区。全市主要有辉发河、一统河、大沙河三大河流,海龙水库和碱水水库两大灌区。

2　数据与方法

2.1　数据来源与遥感影像处理

本研究选用的遥感数据为 2017 年 Landsat OLI 数据和 2010 年 Landsat TM 数据,轨道号为 11830,11831,空间分辨率为 30 m,影像可从地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)免费获取。辅以 1∶5 万地形图对 Landsat 影像进行几何校正,校正使用二次多项式和最近邻像元法且将均方根误差控制在 0.5 个像元内;其次对影像进行大气校正。对两期影像进行镶嵌并使用研究区边界进行裁剪得到研究区遥感影像数据。经过预处理的影像可作为分类的数据源。

非遥感数据包括:①土壤数据。土壤理化性质源自全国第二次土壤普查成果,土壤类型分布源自 1∶100万全国土壤数据。②1∶5 万数字化地形图数据。包含等高线、高程点、水系等要素。③降雨数据。源自梅河口市气象站点 30 a 逐日侵蚀性降雨量资料。④文字资料。包含水土流失治理项目可行性报告和工程措施设计图等,由松辽水利委员会提供。

结合遥感影像的色调、形状、纹理及空间位置等特征,进行野外调查,以此建立土地利用解译标志。根据解译标志,在 ArcGIS 软件中,采取人机交互的方式对地物进行勾绘、解译,得到研究区的土地利用类型数据。根据解译结果和影像预设野外调查样点,使用 GPS 获取野外验证样点 64 个,对土地利用分类结果进行验证。最后以遥感影像为基础,结合水土流失治理项目范围图和实地调查结果,解译获取研究区水土保持措施分布结果。

2.2　RUSLE 模型及土壤侵蚀强度分级

2.2.1　RUSLE 模型　本研究利用修正的美国通用水土流失方程(RUSLE)[9]对梅河口市的土壤侵蚀进行定量评价。RUSLE 模型为:

$$A=R\times K\times L\times S\times C\times P \tag{1}$$

式中：A——土壤侵蚀模数；R——降雨侵蚀力因子；K——土壤可蚀性因子；L——坡长因子；S——坡度因子；C——植被覆盖与管理因子；P——水土保持措施因子。下同。

(1) 降雨侵蚀力因子 R。降雨侵蚀力因子是描述降水导致土壤侵蚀潜在能力大小的定量指标。本研究的降雨资料为气象站点近 30 a 的逐日侵蚀性降雨量资料，因此选择章文波等[18]提出的降雨侵蚀力计算模型，其模型为：

$$M=\alpha\sum_{j=1}^{k}(P_j)^{\beta} \tag{2}$$

式中：M——某半月时段的侵蚀力值；k——半月内的天数(d)；P_j——半月时间内第 j d 的侵蚀性日雨量(mm)，其日雨量大于 12 mm，否则以 0 计算；半月时段以每月 15 日为界进行划分，每月前 15 d 作为一个半月，剩下的天数作为另一个半月，全年依次划分为 24 个时段；α，β——模型待定参数。

$$\beta=0.836\ 3+18.144/P_{d12}+24.455/P_{y12} \tag{3}$$

$$\alpha=21.586\beta^{-7.189\ 1} \tag{4}$$

式中：P_{d12}——日降雨量≥12 mm 的日平均降雨量(mm)；P_{y12}——大于侵蚀性日雨量的年平均雨量(mm)。

基于式(3)—(4)，计算研究区逐年各半月的降雨侵蚀力，累加得到年降雨侵蚀力，取多年平均得到年均降雨侵蚀力。

(2) 土壤可蚀性因子 K。土壤可蚀性因子是反映土壤性能和土壤被蚀的难易程度的指标。本研究参考第一次全国水利普查——水土保持情况普查中的公式计算公式 K 因子[19]计算公式如下：

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.025\ 6S_a\left(1-\frac{S_i}{100}\right)\right]\right\}\left[S_i/(C_1+S_i)\right]^{0.3}\times\left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]\times\left[1-\frac{0.7S_n}{S_n+\exp(-5.51+22.9S_n)}\right] \tag{5}$$

式中：S_a——砂粒(2～0.05 mm)含量(%)；S_i——粉砂(0.05～0.002 mm)含量(%)；C_1——黏粒(<0.002 mm)含量(%)；C——有机碳含量(%)；$S_n=1-\frac{S_a}{100}$。

(3) 坡度和坡长因子。坡度因子 S 和坡长因子 L 用来反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响，通常放在一起考虑，视为地形因子。RUSLE 模型中的公式是通过大量试验得到的经验公式，适合缓坡区域，针对梅河口市坡度在 9%～55%陡坡土壤侵蚀，采用国内研究者发展研究的坡度因子 S 的计算公式[20]为：

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & (\theta<5^\circ)\\ 16.8\sin\theta-0.5 & (5^\circ\leqslant\theta<10^\circ)\\ 21.9\sin\theta-0.96 & (10^\circ\leqslant\theta)\end{cases} \tag{6}$$

坡长因子 L 的计算公式为：

$$L=(\lambda/22.1)^m \tag{7}$$

$$m=\begin{cases}0.2 & (\theta\leqslant1^\circ)\\ 0.3 & (1^\circ<\theta\leqslant3^\circ)\\ 0.4 & (3^\circ<\theta\leqslant5^\circ)\\ 0.5 & (5^\circ<\theta)\end{cases} \tag{8}$$

式中：S——坡度因子；θ——坡度值(°)；L——坡长因子；λ——坡长(m)。

(4) 植被覆盖与管理因子 C。植被覆盖与管理因子(C)主要反映有关植被覆盖和变化对土壤侵蚀的综合作用，是侵蚀动力的抑制因子。本研究根据相关研究成果[21-25]，基于前期获取的土地利用类型数据，采用直接赋值的方法得到研究区不同土地利用类型的 C 因子值(表 1)。

表 1 梅河口市不同土地利用类型 C 因子值

地类	旱地	水田	有林地	灌木林地	其他林地	草地	水域及水利设施用地	居民地	交通运输用地	其他土地
C 值	0.240	0.180	0.025	0.006	0.184	0.010	0	0.153	0.220	0.455

(5) 水土保持措施因子 P。水土保持措施因子是指其他条件相同时，标准小区实施水土保持措施后的土地土壤流失量与标准小区上顺坡耕作土壤流失量之比[21]。借鉴相关参考文献[24,26]，结合本研究实际水保情况，得到研究区不同水土保持措施类型的 P 因子值(表 2)。

2.2.2 土壤侵蚀强度分级标准 本研究将土壤侵蚀模数按照黑土区水土流失综合防治标准(SL446-2009)[27]土壤侵蚀强度分级标准进行分级(表 3)。

表 2 梅河口市不同水土保持措施类型 P 因子值

水保措施	封禁治理	梯田	改垄	地埂	水保林
P 值	0.573	0.029	0.352	0.145	0.497

表 3　土壤侵蚀强度分级标准

侵蚀强度等级	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀
侵蚀模数/〔t·(km^2·a)$^{-1}$〕	≤200	200～1 200	1 200～2 400	2 400～3 600	3 600～4 800	>4 800

3　结果与分析

3.1　土壤侵蚀强度分析

将上述各因子的栅格图,设置统一的投影和栅格分辨率,通过因子叠加运算得到土壤侵蚀模数,并按黑土区的土壤侵蚀标准进行分级,得到研究区 2010 年、2017 年两个时期的土壤侵蚀强度分级结果(表 4)。

表 4　梅河口市土壤侵蚀强度分级统计

侵蚀强度	2010 年			2017 年		
	面积/km^2	比例/%	平均侵蚀模数/〔t·(km^2·a)$^{-1}$〕	面积/km^2	比例/%	平均侵蚀模数/〔t·(km^2·a)$^{-1}$〕
微度侵蚀	1 381.59	63.52	76.34	1 388.92	63.87	76.35
轻度侵蚀	458.88	21.10	698.48	461.67	21.23	694.35
中度侵蚀	189.96	8.74	1 722.81	186.36	8.57	1 720.67
强烈侵蚀	58.21	2.68	2 888.49	56.32	2.59	2 888.06
极强烈侵蚀	29.93	1.38	4 115.25	28.49	1.31	4 115.34
剧烈侵蚀	56.03	2.58	8 476.00	52.84	2.43	8 455.63

2010 年、2017 年研究区的土壤侵蚀以轻度及以下侵蚀强度为主,占整个土壤侵蚀面积的比例分别为 84.62%和 85.10%;其次为中度侵蚀、强烈侵蚀和剧烈侵蚀,极强烈侵蚀面积所占比例最少。研究区整体土壤侵蚀较轻,但强烈及以上侵蚀强度仍占有一定比例,说明研究区局部区域水土流失严重。2010—2017 年,研究区的平均土壤侵蚀模数由 698.75 t /(km^2·a)下降至 678.25 t /(km^2·a),土壤侵蚀状况有所改善。不同强度等级的土壤侵蚀呈现出“两增四减”的趋势,即微度和轻度侵蚀所占面积和比例有所增加,中度及以上强度的土壤侵蚀面积和比例减少。不同强度对应平均侵蚀模数以剧烈侵蚀下降较多,轻度和中度侵蚀略有下降,而其他等级的平均侵蚀模数基本不变。

2010 年、2017 年微度侵蚀呈东北—西南带状分布(图 1),但 2017 年微度侵蚀分布范围较 2010 年有所扩大,扩大区域主要位于研究区的北部和中部。2010 年,轻度和中度侵蚀分布主要分布在研究区的南部和北部;强烈和极强烈侵蚀零散分布在研究区北部;剧烈侵蚀小片状分布在研究区南部。2017 年,轻度侵蚀主要位于研究区西南部,较 2010 年分布范围有所缩小;强烈和极强烈的分布区域与 2010 年基本一致;剧烈侵蚀以东南部为主且分布范围较 2010 年有所扩大。

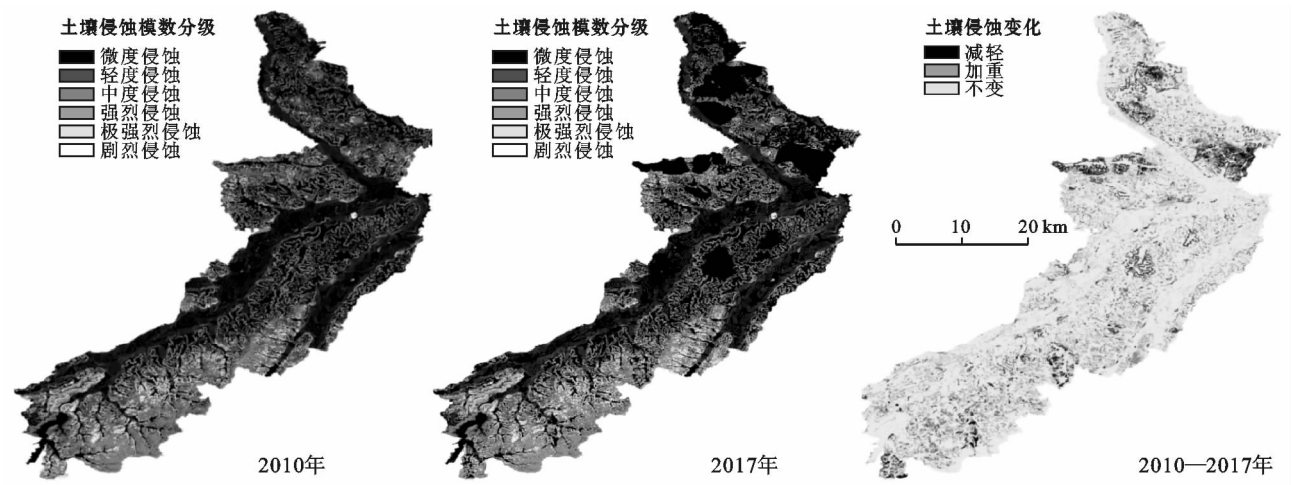


图 1　梅河口市土壤侵蚀强度及变化分布

对 2017 年、2010 年的土壤侵蚀强度分级结果求差，得到研究区土壤侵蚀变化空间分布(图 1)。其中，小于 0 的值表示侵蚀减轻，0 表示侵蚀状况基本不变，大于 0 的值表示侵蚀加重。研究区土壤侵蚀状况为基本不变＞侵蚀减轻＞侵蚀加重，对应面积和所占比例依次为 1 880.99，214.60，79.0 km^2，86.50%，9.87%，3.63%。土壤侵蚀减轻的区域主要位于研究区的北部和东北—西南带状区域，其他区域零星分布；土壤侵蚀加重的区域主要在研究区的东南部、西南小片状以及中部小带状区域。

3.2 土壤侵蚀与影响因素分析

3.2.1 土地利用与土壤侵蚀 不同土地利用类型对应不同植被覆盖和人类干扰程度，不合理的人类活动会加剧土壤侵蚀[3]。研究区的土地利用类型包含耕地、林地、草地、居工用地(居民地与工矿交通运输用地)、水域和其他用地(包含未利用地、裸岩、沙地等)6 大类。2010 年、2017 年研究区土地利用以耕地和林地为主，二者之和分别占土地利用总面积的 89.96% 和 86.53%，其次为居工用地、水域、草地和其他用地。2010—2017 年耕地和林地的面积分别减少 41.29 km^2 和 33.24 km^2；居工用地、水域、草地、其他用地的面积分别增加 39.34 km^2，1.47 km^2，31.99 km^2，1.74 km^2。其中，居工用地增加的面积主要来自耕地；草地增加的面积主要来自耕地和林地。

不同土地利用类型对应不同侵蚀强度(表 5)。2010 年、2017 年耕地以中度及以下强度侵蚀为主，强烈及以上强度侵蚀所占比例也较大，约 10%。林地、居工用地和其他用地以轻度及以下侵蚀强度为主，所占比例超过对应土地利用类型总侵蚀的 90%。草地和水域的侵蚀强度极低。2010—2017 年，耕地的微度和轻度侵蚀比例增加，其他侵蚀等级所占比例减少。水域的土壤侵蚀情况基本不变。草地、居工用地、其他用地的土壤侵蚀具有类似的变化趋势，以微度侵蚀所占比例减少，其他强度等级的侵蚀所占比例增加。其中，其他用地强烈以上侵蚀强度所占比例增加最大。

表 5 梅河口市不同土地利用类型的土壤侵蚀强度

年份	侵蚀类型	土地利用类型					
		耕地	林地	草地	居工用地	水域	其他用地
2010	微度侵蚀/%	65.82	51.84	100	77.12	99.92	25.69
	轻度侵蚀/%	13.29	39.71	0.00	17.93	0.05	66.57
	中度侵蚀/%	10.60	7.18	0.00	3.62	0.02	3.00
	强烈侵蚀/%	3.92	0.95	0.00	0.68	0.01	4.74
	极强烈侵蚀/%	2.18	0.16	0.00	0.35	0.00	0.00
	剧烈侵蚀/%	4.19	0.16	0.00	0.30	0.00	0.00
	平均侵蚀模数/(t·km^{-2}·a^{-1})	932.52	408.88	5.95	306.98	1.59	406.13
2017	微度侵蚀/%	66.25	52.23	92.53	75.69	99.91	24.29
	轻度侵蚀/%	13.58	39.23	7.33	18.24	0.05	66.47
	中度侵蚀/%	10.41	7.07	0.10	4.28	0.02	3.09
	强烈侵蚀/%	3.77	0.99	0.01	0.90	0.01	4.95
	极强烈侵蚀/%	2.08	0.19	0.01	0.45	0.01	0.41
	剧烈侵蚀/%	3.92	0.29	0.02	0.44	0.00	0.78
	平均侵蚀模数/(t·km^{-2}·a^{-1})	895.03	417.23	54.29	340.82	1.9	488.18

2010 年不同土地利用类型的平均侵蚀模数大小为耕地＞林地＞其他用地＞居工用地＞草地＞水域，2017 年为耕地＞其他用地＞林地＞居工用地＞草地＞水域。2010—2017 年研究区平均土壤侵蚀模数减少了 20.50 t /(km^2 · a)。其中，耕地的土壤侵蚀模数降低了 37.49 t /(km^2 · a)，而其他用地、草地和居工用地的侵蚀模数变化较大，分别增加了 82.05，48.34，33.84 t /(km^2 · a)，林地和水域的土壤侵蚀模数略有增加。

研究区中部小块条状区域的土地利用(附图 7—8)由耕地转换为其他用地导致区域土壤侵蚀加重。其他用地一般为裸岩、沙地和未利用地等，缺乏植被对地面的保护作用，而雨水对地表的强烈冲刷作用使土壤中的颗粒物发生迁移，从而更易发生侵蚀。研究区东南部的土地利用由林地转换为耕地和草地，西南小片状区域则由水域转换为草地，类似相对难以发生侵蚀的土地利用类型向易于发生侵蚀的土地类型的转换加重了局部区域的土壤侵蚀。总之，土地利用类型的转换实质为对应的 C 因子取值发生改变，在同等条件下，C 因子取值越大，土壤侵蚀越严重。

3.2.2　坡度与土壤侵蚀　坡度是影响土壤侵蚀发生的主要因素之一,侵蚀强度随着坡度的变化而变化。本研究根据黑土区的坡度侵蚀划分标准[27]将坡度划分为 9 个等级,分析不同坡度下土壤侵蚀特征(图 2)。土壤侵蚀发生在坡度 0°～3°的面积为 1 458.6 km^2,占整个研究区的三分之二;土壤侵蚀分布在坡度 3°～5°,5°～15°,15°～25°的比例分别为 10.05%,17.88%,4.23%;不足 1%的土壤侵蚀发生在坡度大于 25°的区域。总体上,研究区土壤侵蚀面积随着坡度的增加而减少,95%的土壤侵蚀分布在坡度小于 15°的区域,侵蚀面积达 2 065.87 km^2。因此,水土流失治理应集中在坡度低于 15°的区域。

2010 年、2017 年,微度侵蚀主要发生在坡度小于 1.5°的区域,侵蚀面积所占比例分别为 82.73%和 84.72%,随着坡度的升高所占比例有逐渐减少的趋势,在 3°以上趋于平稳。轻度侵蚀主要分布在 0.25°～3°和 5°～15°的坡度带上,两年所占比例分别为 70.75%和 68.41%。强烈和极强烈侵蚀分布具有一致性,0°～3°所占比例较低,随着坡度的增加侵蚀分布比例增加,以 5°～8°分布比例最大。剧烈侵蚀则以 5°以上分布为主,在 8°～15°带上所占面积比例最大。

2010 年、2017 年,平均土壤侵蚀模数总体随着坡度的增加而增大。2010 年,0°～4°带上对应轻度及以下强度侵蚀,4°～25°对应中度侵蚀。2017 年,0°～5°对应轻度及以下强度侵蚀,15°～25°是强烈侵蚀,其他坡度带为中度侵蚀。2017 年与 2010 年相比,<8°的各个坡度带上的土壤侵蚀模数都有所下降,而 8°～25°带上的侵蚀模数有所增加,以 15°～25°坡度带侵蚀模数增加最多。

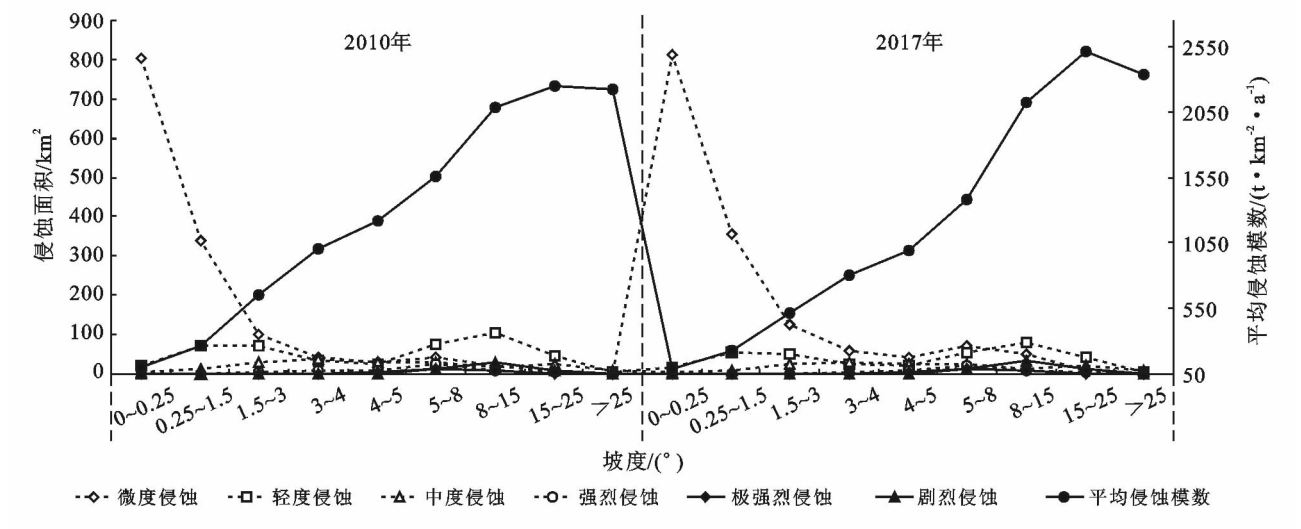


图 2　梅河口市坡度—土壤侵蚀关系

3.2.3　水土保持措施与土壤侵蚀　研究区的水土保持措施包含地埂、改垄、梯田、封禁治理、水保林和其他治理措施 6 大类(表 6)。首先,根据研究区 5 人班小流域 2017 年水保措施实施面积和遥感解译措施面积计算水保措施解译面积的准确率,得到解译面积总体精度为 88.93%,梯田、水保林、封禁治理和其他措施解译的准确率依次为 85.19%,91.49%,87.07%,92.31%。其次,在 ArcGIS 软件中以水保措施斑块为基础数据,运用随机点工具获取水保措施验证点,并结合谷歌高分影像和专家知识对验证点的精度进行验证,获得水保措施验证点的精度为 81.25%。解译获取研究区 2011—2013 年水保措施实施面积为 146.59 km^2,水保林所占比例超过一半。2014—2017 年实施水保措施的面积为 25.84 km^2,以地埂、水保林和封禁治理为主。2011—2017 年,共实施水保措施面积 172.43 km^2,占整个研究区面积的 7.9%。其中,水保林实施面积最大为 83.27 km^2,占水土保持措施比例为 48.29%;其次为地埂和改垄,实施面积和所占比例依次为 36.21 km^2,27.54 km^2,21.01%,15.97%;封禁治理和其他治理措施所占比例较少。

总体上,2011—2013 年水土保持措施分布在研究区的北部和中部,2014—2017 年分布在其南部和东南部。其中,97.32%的水土保持措施分布在坡度<15°,高程<435 m 的区域,其他区域的水土保持措施分布极少。不同类型的水土保持措施分布区域也不同。水保林主要分布在坡度<15°的北部和中部地区,改垄主要分布于研究区北部,地埂和梯田主要分布在坡度<8°的北部和东南部地区,封禁治理和其他水土保持措施主要分布在坡度 5°～25°之间的南部和东南部区域。坡度>25°的区域分布着极少比例的封

禁治理和水保林。水土保持措施的分布区域与土壤侵蚀减轻区域基本一致。因此,水土保持措施的实施是该地区土壤侵蚀减轻的主要原因。但部分水保项目附近存在少量侵蚀加重的区域,可能是因为水保措施实施过程中的一些不合理操作造成的新的水土流失。

表 6 梅河口市各种水土保持措施面积统计

水保措施	2011—2013 年		2014—2017 年		2011—2017 年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
地 埂	28.9	19.71	7.31	28.29	36.21	21.01
改 垄	26.61	18.15	0.93	3.60	27.54	15.97
梯 田	12.66	8.64	4.02	15.56	16.68	9.67
水保林	78.42	53.50	4.85	18.77	83.27	48.29
封禁治理	0	0	6.18	23.91	6.18	3.58
其 他	0	0	2.55	9.87	2.55	1.48

不同水土保持措施的水保效果存在差别(图 3),2017 表示研究阶段不同水保措施实施位置处的平均土壤侵蚀模数,2010 年对应无水保措施的土壤侵蚀模数。水土保持措施的实施在不同程度上降低了区域的土壤侵蚀。其中,封禁治理措施效果最明显,对应土壤侵蚀模数降低了 1 573.47 (km² · a);其次为其他措施、梯田和地埂,平均侵蚀模数分别减少了 749.43,451.18,344.06 t/(km² · a);改垄和水保林实施区域的土壤平均侵蚀模数变化相对较小,分别为 100.46 t/(km² · a)和 35.51 t/(km² · a)。水保措施的治理效果主要表现在坡耕地以及荒山荒坡和林草稀疏区域的治理上。荒山荒坡和林草稀疏区主要治理措施为封禁治理和水保林,封禁治理可以防止人畜进入林区破坏植被,且与水保林共同提高林地的郁闭度,防止雨滴直接溅击地表土壤,从而减轻区域水土流失。坡耕地区域,改垄和地埂植物带的实施可以达到初步控制水土流失的作用,而结合梯田修建等水保措施的实施在很大程度上减缓或控制了区域的土壤侵蚀。

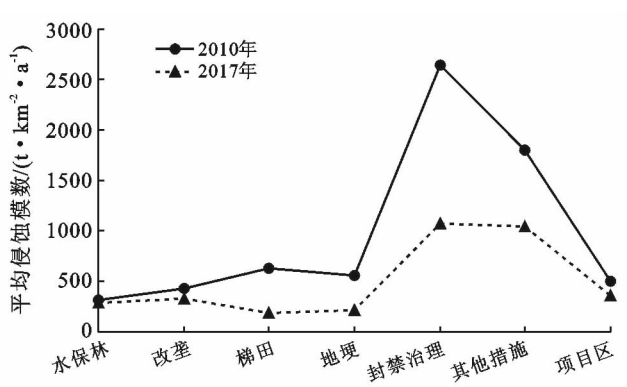


图 3 水土保持措施—土壤侵蚀关系

2010—2017 年研究区的土壤侵蚀模数变化较小,仅减少 20.5 t/(km² · a),但治理区域的平均土壤侵蚀模数存在明显降低,由 2010 年的 506.55 t/(km² · a)下降至 2017 年的 352.47 t/(km² · a),土壤侵蚀量也由 8.73×10^4 t 减少至 6.08×10^4 t,说明区域水土流失治理工作取得一定成效,但治理后的区域仍存在一定强度的侵蚀。因此,区域水土流失治理工作有待加强。

4 结论与讨论

(1) 梅河口市 2010 年、2017 年土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀为主,其平均土壤侵蚀模数分别为 698.75,678.25 t/(km² · a),土壤侵蚀状况有所改善。2010—2017 年土壤侵蚀变化趋势为基本不变>侵蚀减轻>侵蚀加重。其中,土壤侵蚀减轻的区域主要位于研究区的北部和东北—西南带上,侵蚀加重的区域主要位于研究区的东南部及其他小片状区域。

(2) 梅河口市的土地利用以耕地和林地为主,而土壤侵蚀强度表现为耕地>其他用地>林地>居工用地>草地>水域。2010—2017 年,耕地的侵蚀模数减少了 37.49 t/(km² · a),其他用地的侵蚀模数增加最多为 82.05 t/(km² · a)。耕地向居工用地和其他用地的转换以及林地向耕地和草地的转换等加重了区域的土壤侵蚀。

(3) 梅河口市土壤侵蚀面积随着坡度的增加而减少,其中,95% 的土壤侵蚀发生在坡度<15°的区域,而土壤侵蚀强度随着坡度的增加而增大。2010—2017 年,坡度<8°的区域土壤侵蚀模数下降,土壤侵蚀状况得到改善,坡度>8°的区域,土壤侵蚀有所加重。

(4) 梅河口市的水土保持措施以水保林、改垄和地埂为主,占整个水保面积的 85.52%。水土保持措

施主要分布在研究区北部和东南部,与土壤侵蚀减轻分布区域基本一致。2010—2017 年,水保项目实施区域的土壤侵蚀模数减少了 154.08 t/(km^2 · a),土壤侵蚀量减少了 2.65×10^4 t,说明水保措施在改善水土保持功能上取得一定成效,但治理后的土壤仍存在较大强度的侵蚀,水土流失治理工作有待加强。

本研究的不足在于:模型中 C 因子取值建立在土地利用分类基础之上,而 Landsat 影像数据较粗的分辨率和解译经验的缺乏都可能导致分类结果的不准确,进而影响 C 值。其次,p 值数据的获取多以黑龙江宾县的试验数据为准,而区域的差异可能导致 p 值的差异。如何获取精确的 p 值以及基于高分影像数据获取 C 值都有待进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 张晓平,梁爱珍,申艳,等. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理科学,2006,26(6):687-692.

[2] 王文娟,邓荣鑫,郝丽君. 东北黑土区农田防护林与沟谷侵蚀关系[J]. 中国水土保持科学,2017,15(6):44-51.

[3] 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.

[4] 李天宏,郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.

[5] 张喜旺,周月敏,李晓松,等. 土壤侵蚀评价遥感研究进展[J]. 土壤通报,2010,41(4):1010-1017.

[6] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model(EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998,23(6):527-544.

[7] Srivastava A, Wu J Q, Elliot W J, et al. Modeling streamflow in a snow-dominated forest watershed using the water erosion prediction project (WEPP) model[J]. Transactions of the Asabe, 2017,60(4):1171-1187.

[8] Jetten V, Govers G, Hessel R. Erosion models: Quality of spatial predictions[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(5):887-900.

[9] Renard K G, Foster G R, Lane L J, et al. Rusle-revised universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991,46(1):30-33.

[10] Chen Sixu, Yang Xiaohuan, Xiao Linlin, et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model[J]. Resources Science, 2014, 36(6):1288-1297.

[11] Ganasri B P, Ramesh H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS: A case study of Nethravathi Basin[J]. Geoscience Frontiers, 2016,7(6):953-961.

[12] 怡凯,王诗阳,王雪,等. 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀时空分异特征分析:以辽宁省朝阳市为例[J]. 地理科学,2015,35(3):365-372.

[13] 李铖,李俊祥,朱飞鸽,等. 基于 RUSLE 的环杭州湾地区土壤侵蚀敏感性评价及关键敏感因子识别[J]. 应用生态学报,2009,20(7):1577-1585.

[14] 蒋春丽,张丽娟,张宏文,等. 基于 RUSLE 模型的黑龙江省 2000—2010 年土壤保持量评价[J]. 中国生态农业学报,2015,23(5):642-649.

[15] 孟凡影,付伟涛,杨欢,等. 基于 GIS 技术的古城小流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究,2015,22(5):9-13.

[16] 王志杰,简金世,焦菊英,等. 基于 RUSLE 的松花江流域不同侵蚀类型区泥沙输移比估算[J]. 水土保持研究,2013,20(5):50-56.

[17] 赵永军,李长保,常丹东. 国家农发水保项目东北黑土区水土流失综合治理初探[J]. 中国水利,2012(16):60-63.

[18] 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.

[19] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室. 水土保持情况普查[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[20] Liu Baoyuan, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the Asae, 1994, 37(6):1835-1840.

[21] 蔡崇法,丁树文,史志华,等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报,2000,14(2):19-24.

[22] 李玉环,王静,张继贤. 基于 RUSLE 水蚀模数演算与人工神经网络评价[J]. 应用生态学报,2006,17(6):1019-1026.

[23] 宋现锋,段峥,牛海山,等. 土壤侵蚀模型中植被管理因子的遥感估算[J]. 北京林业大学学报,2009,31(3):58-63.

[24] 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):1-9,18.

[25] 张雪花,侯文志,王宁. 东北黑土区土壤侵蚀模型中植被因子 C 值的研究[J]. 农业环境科学学报,2006,25(3):797-801.

[26] 陈正发. 基于 RUSLE 模型的重庆市土壤流失方程研究[D]. 重庆:西南大学,2011.

[27] 水利部松辽水利委员会. SL 446-2009 黑土区水土流失综合防治技术标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.