

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2015.0053

周浩, 雷国平, 冯晓娟, 王金伟, 张博, 赵宇辉. 基于 MUSLE 模型的阿什河流域农业非点源污染风险评估[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(3): 469-476.

Zhou H, Lei G P, Feng X J, Wang J W, Zhang B, Zhao Y H. MUSLE-based risk evaluation of agricultural non-point source pollution in the Ash River watershed[J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(3): 469-476.

基于 MUSLE 模型的阿什河流域农业非点源污染风险评估

周浩¹, 雷国平^{2*}, 冯晓娟¹, 王金伟¹, 张博¹, 赵宇辉¹

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 东北大学土地管理研究所, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 系统评价与分析流域农业非点源污染风险, 对其防控治理具有重要的指导作用。本研究以遥感影像数据、数字高程模型 (DEM)、土壤图件和相关文本资料为基本信息源, 基于遥感和地理信息系统技术, 采用修正通用土壤流失方程 (MUSLE), 结合各乡镇等标污染负荷大小, 对阿什河流域农业非点源污染风险进行评估分析。结果表明: 1) 流域地表潜在侵蚀风险存在明显的空间地域分布规律, 东南部地区风险整体偏高, 而西北部和中部平原地带多为中等和低侵蚀风险区; 乡镇尺度上, 小岭乡、玉泉镇、交界镇、红星乡和大岭乡潜在侵蚀最为严重。2) 流域山地丘陵陵区林地面积大, 侵蚀风险最高, 其平均值为 0.037, 风险贡献率为 61.88%; 农业用地风险贡献率仅次于林业用地, 达到 20.50%; 坡度上, 微坡 36.26% 的风险贡献率在所有坡型中最高。3) 乡镇侵蚀风险分布与对应非点源污染风险不能完全重叠, 位于平原地带的杨树乡和双丰镇侵蚀风险良好, 其单位面积污染风险值远高于乡镇平均值, 应重度防控, 大岭乡、小岭乡和玉泉镇侵蚀风险严重, 污染防治等级为适度。

关键词: 农业非点源污染; 侵蚀; 土地利用类型; MUSLE; 风险; 阿什河流域

中图分类号: X52; X53

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275(2015)03-0469-08

MUSLE-based risk evaluation of agricultural non-point source pollution in the Ash River watershed

ZHOU Hao¹, LEI Guo-ping^{2*}, FENG Xiao-juan¹, WANG Jin-wei¹, ZHANG Bo¹, ZHAO Yu-hui¹

(1. College of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

2. Land Management Institute, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: It is very important for the prevention and control management of agricultural non-point source pollution in watersheds to systematically evaluate and analyze the agricultural non-point source pollution risks. This study used the Ash River watershed as a case and applied the remote sensing image data, the digital elevation model, the soil map and related literature as basic information, the modified universal soil loss equation, the equalized-standard pollution loads of townships, and evaluated and analyzed the agricultural non-point source pollution risks in the watershed. The results showed that the potential erosion risks of most areas were in the range of low to medium conditions and also had significant spatial geographical distribution patterns. The erosion risks of mountain foothills in the southeast region had high or relatively high conditions, where the critical source areas were focused. From the township perspective, Xiaoling Village, Yuquan Town, Jiaojie Town, Hongxing Village and Daling Village were in the most serious condition of erosion risk. The potential erosion risk for the woodland, which was located in the mountainous and hilly areas, owned the highest risk rank with an average value of 0.037 and a contribution rate of 61.88%. The contribution rate of the agricultural land risks was 20.50%; In terms of the slope factor, the risk contribution rate for the slight slope was 36.26%, which was the highest in all slope types. Since the risk location of soil erosion for townships did not completely overlap with the corresponding risk location of the agricultural non-point source pollution, the prevention and control management of the agricultural non-point source pollution should be focused on Yangshu Village and Shuangfeng Town, where the pollution risks were much higher than average, even though their risks of soil erosion showed in a good condition. Dalin Village, Xiaolin Village and Yuquan Town need maintain appropriate prevention and control management as their soil erosion risks presented in a serious condition.

Key words: agricultural non-point source pollution; erosion; land use types; MUSLE; risk; Ash River watershed

水资源是人类生存发展、社会进步繁荣的基本物质资料。社会经济的迅速发展和人口数量的不断

增加导致水资源利用日趋紧张^[1], 人类对水资源的不合理利用已引起了一系列水环境污染问题^[2]。随

基金项目: 农业部公益性行业项目(200903009-2); 教育部博士学科点基金博导类项目(20112325110007)。

作者简介: 周浩(1990-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事土地资源利用方面的研究, E-mail: zhouhao7404@163.com; 通讯作者: 雷国平(1963-), 男, 黑龙江青冈人, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用与规划方面的研究, E-mail: guopinglei@126.com。

收稿日期: 2014-07-07, 修回日期: 2015-03-12

着工业废水等点源污染的有效控制,非点源污染已经成为水环境污染最重要的污染源,而非点源污染又以农业生产、生活等引起的农业非点源污染最为普遍^[3-5]。由于其具有分布范围广、潜在性强、控制难度大等特点,对农业非点源污染的防控与治理研究具有重要的现实意义^[6-8]。

不同区域土壤质地、地形地貌、土地利用方式、产业结构等存在差异,其污染发生的时空、程度也各不相同。识别区域农业非点源污染发生的潜在风险,圈定最易产生污染物的地段和部位^[9-10],能够实现对农业非点源污染针对性的控制和高效地治理。国内学者针对农业非点源污染的研究起步较晚,多集中于 N、P 在土壤中的迁移转化机理流失特征及其影响因素^[11-12]、农业非点源污染负荷量化研究及影响评价^[13]、农业非点源污染管理政策及技术研究^[14-15]等方面,尚存在系统的基础性数据缺乏、非点源污染监测不足、量化研究手段薄弱等困难。数学模拟是用来分析和评估流域农业非点源污染问题最好的技术方法^[16],20 世纪 70 年代逐渐发展起来的分布式非点源污染模型(如 ANSWERS、AGNPS、SWAT 模型)和集中式非点源污染模型(如 USLE、RUSLE 模型)普遍存在基础数据获取困难、操作流程复杂、模拟尺度有限等问题^[17],Sivertun^[18]提出的简化 MUSLE 模型具有运算数据量小、参数简单、模拟尺度小等特点,能够快速直观的在 GIS 平台上实现流域农业非点源污染的风险识别^[16]。

当前,农业非点源污染研究多从田块、流域尺度进行,缺少行政区划尺度上的污染定量评估,不利于地方政府污染防控治理上的相关政策制定与实施^[19]。松花江流域是东北重要的商品粮生产基地和工业集中地,松花江一级支流阿什河位于哈尔滨市郊区,流域内近年经济发展迅速、农业生产强度大,水环境问题日益突出。本文在国内外已有研究的基础上,针对阿什河流域地区,利用遥感和地理信息系统技术,借助改进的通用土壤流失方程 MUSLE,选取范围内阿城区及周边乡镇作为研究对象,结合核算出的乡镇等标污染负荷量,对流域农业非点源污染风险进行评估,识别污染关键源区,为水环境污染的防控治理提供基础支持。

1 研究区概况与数据预处理

1.1 研究区选取

阿什河位于黑龙江省南部,属于松花江干流右岸一级支流,发源于大青山南麓,自东向西流经尚志市、五常市、哈尔滨市阿城区、香坊区、道外区,在哈

尔滨市东北角注入松花江。阿什河流域 127°37'42"–127° 37'45"E,45°49'15"–45°96'15"N)属温带、中温带大陆性季风气候,冬长夏短,多年平均气温 3.9℃,无霜期 130–136 d。多年平均降水量 400–750 mm,降雨主要集中于 6–9 月,降雪集中于 11 月–次年 2 月,夏季降水量占全年的 60%–70%,降雨集中易形成洪涝灾害,土壤侵蚀严重。阿什河流域地形西北部平坦、低洼,东南部多山,中下游为丘陵平原,土壤多为黑土,属农业主产区。流域上游为林区,植被覆盖良好,中下游为城市区和农业区,主要的农作物为水稻、玉米和大豆。流域内山地面积占 51.8%,丘陵面积 15%,平原面积 33.2%,森林覆盖面积 31%。

本研究选取阿什河的阿城区—入松花江口河段流域为研究区,该区域为传统农业用水区,水环境污染严重。在行政区划上包括阿城区及小岭、玉泉、交界、亚沟、双丰、杨树、舍利、新华、红星、料甸、大岭 11 个乡镇以及哈尔滨市香坊区的幸福镇、向阳乡、成高子镇和道外区的团结镇(图 1)。

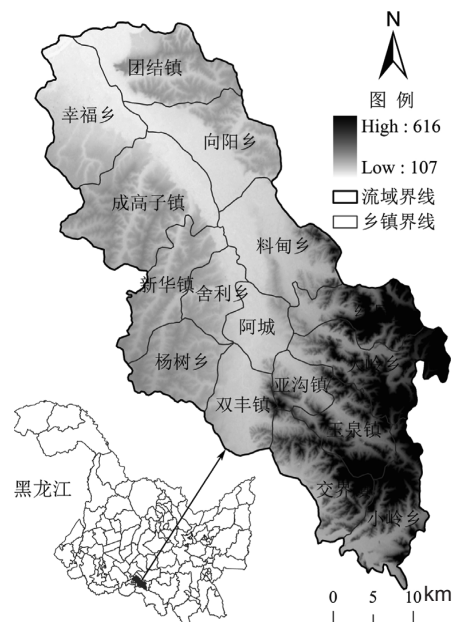


图 1 阿什河流域地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of the Ash River watershed

1.2 数据获取与预处理

本研究选取 2012–2013 年代表性时间点的覆盖研究区 TM 影像四景,平均云量均在 1%以下,影像经系统辐射校正和精确地面点的几何校正,结合各月份平均降水量对地表平均植被覆盖度进行估算;选取 2013 年覆盖研究区作物生长季 OLI 影像两景,经几何纠正和配准,建立解译标志,进行人机交互式判读,结合相关图件以提高解译精度,通过查错修改和拼接得到流域土地利用类型图;地形及河

网原始数据源来自 SRTM 的 DEM 数据,精度为 90 m,利用 ArcGIS 水文模块进行洼地填充得到无洼地 DEM,对处理后的 DEM 数据进行坡度提取、水流方向提取和汇流长度的计算得到坡长数据,经水流积聚计算提取河网数据,河网栅格阈值设为 1 000;搜集研究区土壤类型图、行政边界图等基本图件资料及相关环境质量报告书、统计年鉴和有关的农事生产资料,各图件经配准校正后,统一转为克拉夫斯基投影,并由行政边界裁剪备用。

2 农业非点源污染风险评估

2.1 MUSLE 模型及其因子确定

土壤侵蚀的强弱决定其吸附污染物(如化肥、农药、畜禽粪便等)的流失程度,应用土壤侵蚀模型可为农业非点源污染的研究提供科学依据^[20]。Sivertun 和 Prange^[18]提出的简化 USLE 模型,即 MUSLE 模型,能够较好地进行地表潜在侵蚀风险的识别,其表达式如下:

$$P=K \times S \times W \times U \quad (1)$$

式中: P 为侵蚀风险图,显示地表潜在土壤侵蚀风险; K 为土壤因子图; S 为地形因子图; W 为河网分布因子图; U 为作物管理及植被覆盖因子图。

2.1.1 土壤因子 K 土壤因子指的是在地面径流作用下土壤对侵蚀营力分离和土壤搬运作用的敏感性,体现了土壤被冲蚀的难易程度。 K 值大小与土壤质地存在较高的相关性,根据搜集到的研究区土壤图可知,域内主要土壤类型为黑土、草甸土、白浆化暗棕壤和水稻土。结合《黑龙江土种》资料获得各类型土壤的质地、有机质含量、孔隙度等理化性质并查看诺曼图,参照张树文等^[21]、王万忠和焦菊英^[22]总结出的主要土壤类型 K 值,对土壤图进行属性赋值后得到土壤因子图。

2.1.2 地形因子 S 地形因子是指在其他条件相同的情况下,任意坡度和坡度 9%、坡长 22.1 m 的单位面积地块土壤流失量的比值,体现了地形地貌对土壤侵蚀的影响^[23]。地形因子计算公式为:

$$S=(\lambda/22.1)^m (65.41\sin^2\theta+4.56\sin\theta+0.065) \quad (2)$$

式中: λ 为坡长; m 为坡长指数; θ 为坡度角(以弧度表示)。

坡长 λ 通常指在地面上任意一点沿水流方向到其流向起点间的最大地面距离在水平面上的投影长度。由于流域内原始 DEM 表面存在凹陷情况,需利用 ArcGIS 水文模块 Hydrology 对原始 DEM 进行洼地填充处理,根据得到的流域无洼地 DEM 数据,采用最大坡降方法对水流方向进行提取,进而利用

fill 工具计算出汇流长度,坡度角可利用 ArcGIS 坡度工具 Slope 直接提取。结合坡长计算公式得到研究区坡长图,计算公式如下:

$$\lambda=L \times \cos\theta \quad (3)$$

式中: L 为汇流长度; θ 为坡度角。

根据 Wischmier 和 Smith^[24]的研究,坡长指数 m 变化范围为 0.2-0.5,具体取值范围如下所示:

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 1\% \\ 0.3 & 1\% \leq \theta < 3\% \\ 0.4 & 3\% \leq \theta < 5\% \\ 0.5 & \theta \geq 5\% \end{cases} \quad (4)$$

利用 ArcGIS 栅格计算功能实现公式 (3) 和 (4) 的计算,结合公式 (2) 得到研究区地形因子图。

2.1.3 河网分布因子 W 距离水域的远近是影响地表水土流失程度的一个重要因素,河网分布直接决定了侵蚀潜在风险,一般而言,距离河流、湖泊、水库等越近,土壤被侵蚀的风险值越高,具体公式如下:

$$f(x) = \frac{0.6}{e^{0.002x} - 0.4} \quad (5)$$

河网是基于汇流累积矩阵生成的,通过 ArcGIS 对提取出的流域无洼地 DEM 进行汇流累积量计算,利用栅格计算功能将所有大于河网栅格阈值的像素进行提取而得到河网分布图,其中栅格阈值设定为 1 000。利用空间分析工具计算出流域内单个栅格距河网的欧式距离 x ,结合公式 (5) 生成流域河网分布因子图。

2.1.4 作物管理及植被覆盖因子 U 作物管理及植被覆盖因子指的是在土壤、坡度、降水等条件一致的情况下,单位面积地块在耕作期和休闲期的土壤流失量比值。四个因子中 U 因子对土壤侵蚀影响最大,最能体现地表土壤侵蚀的潜在风险。 U 因子反映植被对地表土壤的保护作用,植被覆盖度越高,因子值越小,其值范围在 0-1 之间。本文根据蔡崇法等^[25]建立的 U 因子和植被覆盖度 C 之间的关系式,结合研究区土地利用状况来计算作物管理及植被覆盖因子,关系式如下:

$$U = \begin{cases} 1 & C=0 \\ 0.6508-0.34361gC & 0 < C \leq 78.3\% \\ 0 & C > 78.3\% \end{cases} \quad (6)$$

式中: C 为生长季植被覆盖度,应用上式时可将 C 作为全年地表平均植被覆盖度,基于多时相遥感影像能够提取大范围地表植被覆盖度。研究区地处黑龙江省南部,4月初至5月植物逐渐生长返青,5月下旬至9月初植物生长旺盛,降雨相对丰富,为主要的农事活动期,地表植被覆盖度高,9月中下旬至10

月末降雨较少,气温下降,地表植被覆盖度逐渐降低,冬季寒冷漫长,11月至次年3月末基本为冰雪覆盖。通过分析发现研究区地表植被覆盖度年内变化与降水量以及农事活动存在较高的一致性。本研究获取 2012–2013 年上述四个时间段代表性时间点 TM/ETM 影像数据,利用 ENVI 软件进行归一化植被指数 (Normal Differential Vegetation Index, NDVI) 提取,基于李苗苗等^[26]在像元二分模型基础上研究的模型,对研究区植被覆盖度进行近似估算,具体公式如下:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (7)$$

式中:VFC 表示植被覆盖度,NDVI_{soil} 表示完全裸土或无植被覆盖的区域 NDVI 值,NDVI_{veg} 表示完全被植被所覆盖的 NDVI 值。为降低噪声对实际结果的影响,研究中将置信度范围设为 5%–95%,根据估算出的植被覆盖度,结合全年天然降水量数据,选择各时段平均 Fournier 指数作为平均因子求取全年平均地表植被覆盖度,为便于研究,将以上四个时段月份取整,具体公式如下:

$$C_{year} = \frac{\sum_{i=4}^5 \frac{J_i^2}{J} \times C_1 + \sum_{i=6}^8 \frac{J_i^2}{J} \times C_2 + \sum_{i=9}^{10} \frac{J_i^2}{J} \times C_3 + \sum_{i=11}^3 \frac{J_i^2}{J} \times C_4}{\sum_{i=1}^{12} \frac{J_i^2}{J}} \quad (8)$$

式中: C_{year} 表示全年平均地表植被覆盖度; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别代表 4–5 月份、6–8 月份、9–10 月份、11 月–次年 3 月份的地表覆盖度; J_i 为 i 月份的月降水量 (mm); J 为年降水量 (mm)。

研究将流域用地类型进行归并处理后分为农业用地、建设用地、林地、草地、水域用地和未利用地 6 种土地利用类型。结合得到的全年地表平均覆盖度数据,以栅格为基本单元,计算流域不同用地类型下年均地表植被覆盖度,结合公式 (6) 得到各用地类型的年均 U 估算值 (表 1),并进行属性赋值操作得到流域作物管理及植被覆盖因子图。

表 1 各土地利用类型年均覆盖度 C 及 U 因子值
Table 1 Annual coverage factor C and U values of land use types

土地利用类型	年均地表覆盖度 C (%)	U 因子值
农业用地	15.856	0.238
建设用地	2.403	0.520
林地	11.178	0.291
草地	20.130	0.203
水域用地	0.422	0.780
未利用地	0.120	0.967

2.2 污染风险评估

研究采用等分频率曲线法进行 MUSLE 模型的

侵蚀风险指数等级划分,即利用等间隔分级方案将侵蚀风险值分为 256 组并绘制频数直方图,将频数出现突变、空白区域或风险值较低的组别作为侵蚀风险级别划分的界线以确定地表侵蚀风险 (分低、中等、较高和高四个级别) 的划分范围。依据风险等级的高低并结合对应风险级别乡镇的数量进行潜在侵蚀程度的赋值,具体赋值方法如下:

$$\sum_1^a x_a + \sum_1^b x_b + \sum_1^c x_c + \sum_1^d x_d = 1 \quad (9)$$

其中: $x_a : x_b : x_c : x_d = 1 : 2 : 3 : 4$; a 、 b 、 c 和 d 依次代表风险级别为低、中等、较高和高的乡镇。

农药化肥施用、禽畜养殖、农村生活污水等作为农业非点源污染中 N、P 最主要的来源,其利用或排放程度影响着流域水体污染水平,考虑到 MUSLE 模型仅从物理层次上就土壤、地形、河网和作物植被四个因子进行研究,在具体污染防控上未充分结合区域实际情况,而等标污染负荷作为常用的衡量区域污染物排放量指标^[27],其体现出农业生产或生活可能对水体造成的污染能力。研究中基于 MUSLE 模型,结合流域等标污染负荷核算值进行污染的风险综合评估,等标污染负荷公式如下所示:

$$P = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{C_{ij}}{C_{\alpha i}} Q_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{M_{ij}}{C_{\alpha i}} \quad (10)$$

式中: P 为等标污染负荷量; m 为污染源的数目,研究中将化肥、禽畜养殖、农村生活和农作物秸秆作为流域的典型污染源,即 $m=4$; n 为第 j 个污染源中第 n 个污染物; C_{ij} 表示该污染源中第 i 种污染物的排放浓度 (mg/L); $C_{\alpha i}$ 为第 i 种污染物的评价标准。文中采用 GB 3838—2002 III 类标准,即 COD 20 mg/L, TN 1.0 mg/L, TP 0.2 mg/L; Q_{ij} 为第 j 个污染源含污染物的介质排放量 (m^3/a); M_{ij} 为第 j 个污染源第 i 种污染物流失量 (t/a)。

基于 GIS 空间分析功能,以栅格为基本评价单元,结合上述 MUSLE 因子关系式进行地图的代数操作得到各因子指数图,将单个栅格 K 、 S 、 W 、 U 因子相乘得到流域地表侵蚀风险指数值,以乡镇为单元进行统计分析。利用公式 (9) 进行乡镇潜在侵蚀程度的赋值,将赋值结果与利用公式 (10) 获得的等标污染负荷核算值相乘得到流域农业非点源污染风险值,研究中污染负荷值的计算参考了周军等^[19]针对阿什河流域农业非点源污染的研究成果。

3 结果与分析

3.1 地表潜在侵蚀风险分布特征分析

3.1.1 侵蚀风险空间分布特征 利用等分频率曲线

法进行地表侵蚀风险指数等级划分(图 2a),根据划分结果对流域各级别风险进行栅格面积统计(表 2)。结果表明,阿什河流域地表侵蚀风险从低到高依次所占面积比例为 58.30%、33.59%、6.22% 和 1.90%,大部分地区处于低或中等污染风险状态。从图 2b 可以看出,流域内侵蚀风险存在明显的空间地域分布规律。东南部地区整体呈现侵蚀风险高或较高态势,属于流域地表土壤侵蚀的关键区域,其中,侵蚀风险高的区域为该流域水土流失易发生带,该

区域大部分地区为山地丘陵地带,地势较高,地形起伏较大,且土壤多为山地暗棕壤,使得其表层土壤相对易于被侵蚀。土壤流失程度的强弱决定了其吸附污染物的流失程度,河流水体沿岸地区地表径流量大,土壤侵蚀严重,易发生农业非点源污染,结合流域水系图可以明显看出河流水域沿岸地区潜在侵蚀风险明显偏高。中等和低侵蚀风险区多集中于西北部和中部平原地带,该区域属传统农业主产区,地势平坦,平均汇流量较小,植被覆盖良好。

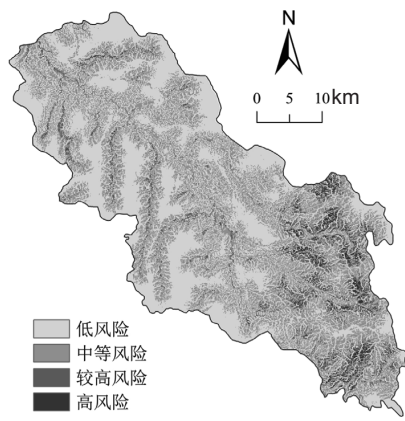
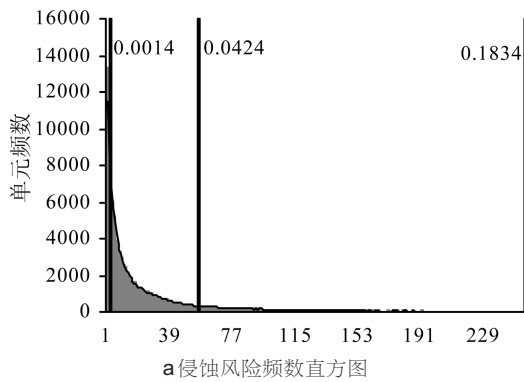


图 2 阿什河流域地表侵蚀风险分级

Fig. 2 Risk rank of the agricultural non-point source pollution of the Ash River watershed

表 2 阿什河流域地表侵蚀风险分布统计

Table 2 Risk distribution statistics of the agricultural non-point source pollution of the Ash River watershed

风险级别	分级标准 Q	栅格数 (个)	面积 (km ²)	面积百分比 (%)
低	0 ≤ Q < 0.0014	155 869	981.13	58.30
中等	0.0014 ≤ Q < 0.0424	89 787	565.17	33.59
较高	0.0424 ≤ Q < 0.1834	16 616	104.59	6.22
高	0.1834 ≤ Q < 11.9623	5 066	31.89	1.90
总计	0 ≤ Q < 11.9623	267 338	1 682.78	100.00

注:栅格大小 79 m × 79 m。Q 为侵蚀风险。

对流域各乡镇侵蚀风险进行面积统计(图 3),从图中可以看出,小岭乡、玉泉镇、交界镇、红星乡和大岭乡地表侵蚀风险最为严重,其中,大岭乡高和较高污染风险面积分别为 9.53 km² 和 19.89 km²,二者约占该乡总面积的 23.70%,是流域风险比例最高的乡镇,其余四个乡镇的高和较高风险比例之和分别为 16.83%、21.68%、15.71% 和 18.08%,这些乡镇多位于流域东南部的山地丘陵地带,易发生土壤侵蚀作用。通过统计分析发现,以上五个乡镇为整个流域地表侵蚀风险的主要来源,其潜在侵蚀风险高和较高区域面积之和占整个研究区面积的 71.09%。双丰镇、团结镇、杨树乡、料甸乡和向阳乡的土壤多为黑土、草甸土,属粘质土壤,地形相对平坦,产业以农业生产及其加工为主,污染风险状况整体表现良好,其中,低侵蚀风险区面积分别占各自乡镇面积的

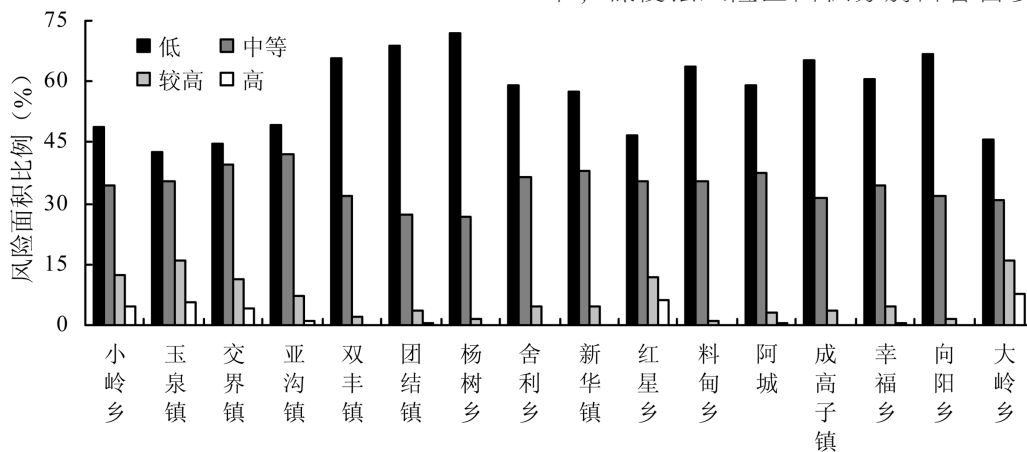


图 3 乡镇地表潜在侵蚀风险

Fig. 3 Potential risks of soil erosion of townships

65.59%、68.86%、71.68%、63.46%和 67.03%，在物理层面上这些乡镇的农业非点源污染发生几率较低。

3.1.2 不同土地利用类型和坡型下风险分布特征
不同土地利用类型下的土壤、地形地貌、植被覆盖等因素存在差异,其潜在侵蚀风险状况也各不相同。对流域内侵蚀风险按土地利用类型进行分类统计,并进行算术平均,得到各土地利用类型下地表侵蚀风险的估算结果(表 3)。从表中可以看出,阿什河流域地表潜在侵蚀风险主要来自于林地、农业用地和建设用地,其中林地面积仅占整个流域面积的 29.40%,但其侵蚀风险贡献率却达 61.88%,侵蚀风险平均值 0.037。流域属传统农业主产区,农业用地面积比例高达 53.93%,尽管其风险平均值仅为 0.007,但风险贡献率仅次于林业用地,为 20.50%。林业用地多分布于流域东南部大青山南麓,该区域为山地丘陵区,地形起伏较大,是阿什河上游地区,地表容易产生大量的径流。流域内建设用地面积比例为 15.50%,其侵蚀风险贡献率达 16.00%,二者比例相当,这主要是由于建设用地平均侵蚀风险值 0.018,接近于整个流域平均值。而水域用地和未利用地虽然地表侵蚀风险贡献率为 1.31%和 0.30%,但其风险平均值相对较高,达到 0.021 和 0.069,由于二者多分布于河流湖泊周围,平均汇流较多导致模型模拟的地表侵蚀风险值较高。随着今后流域土地利用开发强度的不断加大,水域用地和未利用地面积比例将越来越低,其地表侵蚀风险贡献率也将随之越来越低。草地大部分分布于中部平原地带,地表植被覆盖相对良好,侵蚀风险值很低,加之面积比例极小,其侵蚀风险贡献基本可以忽略不计。

表 3 不同土地利用类型的侵蚀风险
Table 3 Soil erosion risks of land use types

土地利用类型	风险贡献率(%)	风险平均值
农业用地	20.50	0.007
建设用地	16.00	0.018
林地	61.88	0.037
草地	0.00	0.000
水域用地	1.31	0.021
未利用地	0.30	0.069

地表坡度在很大程度上反映着土壤被冲蚀的难易程度,直接影响着流域地表发生土壤侵蚀的潜在风险。根据阿什河流域地表坡度具体范围情况,结合《水土保持综合治理规划通则》中的坡度 θ 分级标准,将坡度分为微坡 ($0^\circ \leq \theta < 5^\circ$)、较缓坡 ($5^\circ \leq \theta < 8^\circ$)、缓坡 ($8^\circ \leq \theta < 15^\circ$)、较陡坡 ($15^\circ \leq \theta < 25^\circ$)、陡坡 ($25^\circ \leq \theta < 35^\circ$) 和急陡坡 ($\theta \geq 35^\circ$) 6 个级别。对流域内不同坡度类型的侵蚀风险进行统计(表 4),结果显

示,流域地表潜在侵蚀风险主要来自坡度 $0^\circ \leq \theta < 25^\circ$ 之间的微坡、较缓坡、缓坡和较陡坡四种坡型,其中,尽管微坡潜在侵蚀风险平均值在所有坡型中最低,仅为 0.008,但其面积比例高达 76.57%,使得该坡型侵蚀风险贡献率最高,达到 36.26%。结合流域内土地利用实际情况可以发现,该坡型多位于流域西北部和中部地区,为阿什河流域主要的农业生产和社会经济活动区域,地形平坦。缓坡的侵蚀风险平均值为 0.048,其风险贡献率达 26.90%,仅次于微坡贡献率。而急陡坡的侵蚀风险贡献率虽然仅为 0.58%,但其侵蚀风险平均值远大于其他坡型的风险值,达到 0.513。这主要是由于该坡型主要分布于东南部山区,虽然其面积仅占整个流域面积的 0.02%,但其坡度大,表层土壤易于流失,因此侵蚀风险平均值很高。

表 4 流域不同坡型污染风险
Table 4 Pollution risk of the slope types in the watershed

坡型	风险贡献率(%)	风险平均值
微坡	36.26	0.008
较缓坡	13.43	0.028
缓坡	26.90	0.048
较陡坡	14.38	0.067
陡坡	8.45	0.096
急陡坡	0.58	0.513

3.2 乡镇非点源污染风险评估

土壤侵蚀的强弱决定了其吸附污染物的流失程度,基于上述地表潜在土壤侵蚀风险的评价结果,结合流域内各乡镇等标污染负荷核算值进行农业非点源污染的风险评估(图 4)。研究结果表明,阿什河流域各乡镇等标污染负荷量差异明显,污染负荷量最高的乡镇为位于流域中部偏南的杨树乡,其值达到 $1\ 071.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,阿城区产业以工业为主,基本不存在农业活动,其农业污染等标负荷量仅为 $63.15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。杨树乡、双丰镇、新华镇、向阳乡和料甸乡 5 个乡镇等标污染负荷量占到该流域总负荷量的 56.76%,该地区农业从业人员比例相对较高,种植业发达,畜牧业也占一定比例等因素导致其农业污染负荷量大,以上 5 个乡镇中除新华镇外,对应的农业非点源污染风险值均相对偏高,其中杨树乡污染风险值达到 64.92。位于流域中部偏北的向阳乡污染风险值仅次于杨树乡,达到 56.19。尽管大岭乡等标污染负荷量仅为 $368.36 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,但地貌类型以山地丘陵为主,潜在侵蚀风险非常大,导致其农业非点源污染风险值达到 44.65,在流域各乡镇中排名第五。幸福乡、成高子镇、阿城区和亚沟镇污染风险值非常低,其平均值仅为 5.58,这些乡镇多位于流域平

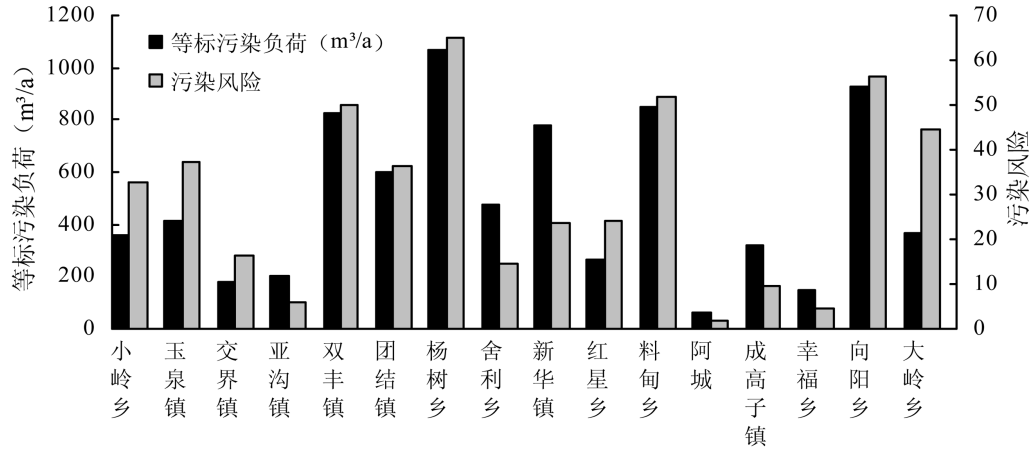


图 4 各乡镇等标污染负荷量及污染风险

Fig. 4 Pollution risks and equalized standard pollution loads of the townships

原地带,产业以工业和服务业为主,农业从业人口相对较少,域内水体以点源污染为主。

风险值的高低体现着今后农业非点源污染的防控力度,在得到的污染风险值基础上,以乡镇为单元计算其单位面积上对应的污染风险值,利用自然分割法进行乡镇农业非点源污染防控程度的划分(图 5),结果表明,阿什河流域各乡镇侵蚀风险分布与对应非点源污染风险不能完全重叠,农业非点源污染的防控应重点集中于杨树乡、双丰镇、向阳乡、料甸乡、大岭乡、玉泉镇和小岭乡,其中杨树乡和双丰镇应该重度防控,二者单位面积上的污染风险值分别达到 $0.730/\text{km}^2$ 和 $0.580/\text{km}^2$,远高于流域范围内的平均值 $0.017/\text{km}^2$ 。位于流域北部的团结镇和中部的新华镇、舍利乡以及南部的红星乡和交界镇可一般防控,幸福乡、成高子镇、阿城区和亚沟镇单位面积污染风险值仅为 $0.060/\text{km}^2$,该区域可轻度防控,实施差别化的农业非点源污染防控措施能够更有效地

治理阿什河流域水环境污染问题。

4 结论

1) 在地表的土壤侵蚀风险空间分布上,阿什河流域潜在侵蚀风险存在明显的空间地域分布规律,东南部地区整体呈现侵蚀风险高或较高态势,西北部和中部平原地带多为中等和低侵蚀风险区;乡镇角度上小岭乡、玉泉镇、交界镇、红星乡和大岭乡地表侵蚀风险最为严重。

2) 在不同土地利用类型和坡型下的侵蚀风险分布上,大部分位于山地丘陵地带的林地潜在侵蚀风险值在所有用地类型中最高,其风险平均值达到 0.037 ,风险贡献率 61.88% ;农业用地由于面积较大,其 20.50% 侵蚀风险贡献率仅次于林地;坡度上,微坡侵蚀风险贡献率在所有坡型中最高,达到 36.26% 。

3) 在乡镇的农业非点源污染风险评估上,流域内乡镇间等标污染负荷量差异明显,负荷量最高的杨树乡达到 $1\ 071.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,而最低的阿城区仅为 $63.15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$;乡镇侵蚀风险分布与对应非点源污染风险不能完全重叠,以平原为主的杨树乡和双丰镇侵蚀风险良好,但其单位面积污染风险值远高于流域乡镇平均值的 $0.017/\text{km}^2$,应该重度防控,向阳乡、料甸乡、大岭乡、玉泉镇和小岭乡应适度防控,团结镇、新华镇、舍利乡、红星乡和交界镇一般防控,幸福乡、成高子镇、阿城区和亚沟镇可轻度防控。

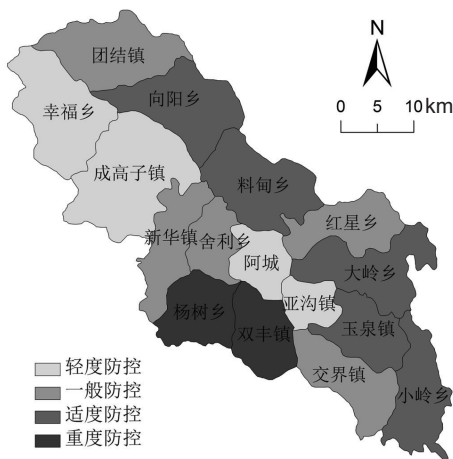


图 5 阿什河流域各乡镇污染防控程度

Fig. 5 Ranks of pollution prevention and control management of the townships

5 讨论

农业非点源污染形成机理复杂、影响因素众多,需要不同尺度的宏观机理模型的应用、计算机模拟

等技术才能有效地实现非点源污染的深入研究^[17]。考虑到土壤侵蚀的强弱决定了其吸附污染物的流失程度,学者们常用修正通用土壤侵蚀方程 USLE 或其改进的 MUSLE 模型等非点源污染模型识别流域内的污染高风险区,将土壤流失严重的地区作为农业非点源污染的关键源区^[17],但潜在非点源污染风险区的分布与土壤中营养元素的本底值、化肥的施用量、禽畜养殖产生的粪便量、农村生活污水排放量等密切相关,因此地表土壤侵蚀风险严重的地区并不一定是污染风险性高的地区,单纯地利用土壤侵蚀模型进行农业非点源污染风险的识别评估可能不太全面和科学,本研究将化肥、禽畜养殖、农村生活和农作物秸秆作为流域典型污染源,利用核算出的等标污染负荷量,结合 MUSLE 模型得到的地表潜在侵蚀风险并进行流域农业非点源污染的风险识别评估,综合考虑了土壤侵蚀作用下的土壤、地形、河网和作物植被四种物理层次上的因子和流域乡镇内农业生产及人们生活所导致的非点源污染,并提出今后流域污染的防控方向。研究结果与单纯地利用 MUSLE 模型进行污染风险评价存在一定的差异, MUSLE 模型模拟结果显示大岭乡高风险土壤侵蚀的面积比例最大,按传统的土壤侵蚀和非点源污染之间的关系解释^[6],该区域应该重点防控非点源污染,实际上大岭乡林地面积较大,基本无化肥投入,地表覆盖好,防控程度理论上可以降低,而本研究结果表明杨树乡和双丰镇应该重度防控,该区域农药化肥投入很大,也存在一定的牲畜饲养,说明文中流域污染风险评估结果与实际情况更为符合。以上分析表明针对阿什河流域,文中所采用的污染风险评估方法较单纯地利用 MUSLE 模型进行评价更为合理科学。

参考文献:

- [1] 余炜敏,魏朝富,谢德体.太湖流域与长江三峡库区农业非点源污染对比研究[J].水土保持学报,2004,18(1):115-118.
- [2] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生.农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J].农业工程学报,2008,24(4):290-295.
- [3] 麻德明,石洪华,丰爱平.基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算——以莱州湾为例[J].生态学报,2014,34(1):173-181.
- [4] 高超,朱建国,窦贻俭.农业非点源污染对太湖水质的影响:发展态势与研究重点[J].长江流域资源与环境,2002,11(3):260-263.
- [5] 王少丽,王兴奎,许迪.农业非点源污染预测模型研究进展[J].农业工程学报,2007,23(5):265-271.
- [6] 张玉斌,郑粉莉,武敏.土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J].水科学进展,2007,18(1):123-132.
- [7] US EPA. National water quality inventory: Report to congress executive summary[R]. Washington D.C: USEPA, 1995.
- [8] 唐艳凌,章光新.流域单元景观格局与农业非点源污染的关系[J].生态学杂志,2009,28(4):740-746.
- [9] 丁恩俊,谢德体,魏朝富,等.基于 MUSLE 模型的三峡库区重庆段农业非点源污染危险性评价[J].西南大学学报:自然科学版,2010,32(5):96-101.
- [10] Gburek W J, A N Shapley. Hydrologic control on phosphorus loss from upland agricultural watersheds[J]. Environment Quality, 1998, 27(2):267-277.
- [11] 高超,张桃林,吴蔚东.农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J].环境科学学报,2001,21(3):344-348.
- [12] 黄海波,高扬,曹杰君,等.都市农业村域地下水非点源氮污染及其风险评估[J].水土保持学报,2010,24(3):56-29,70.
- [13] 李潇瀚,王瑞,卞建民,等.基于 GIS 的伊通河流域农业非点源污染风险评估[J].中国水土保持,2012,9(1):33-35.
- [14] 李瑞雪.三峡库区小流域治理模式和决策支持系统研究[D].重庆:西南农业大学,2005.
- [15] 邹桂红,崔建勇.基于 ANNAGNPS 模型的农业非点源污染模拟[J].农业工程学报,2007,23(12):11-17.
- [16] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明,等.基于 GIS 和 USLE 的非点源污染关键源区识别[J].水土保持学报,2007,21(2):170-174.
- [17] 李振伟,丁兴修,姚孝友,等.农业非点源污染关键源区识别方法研究进展[J].生态学杂志,2011,30(12):2907-2914.
- [18] Svrtun A, Prange L. Non-point source critical area analysis in the Gissel watershed using GIS[J]. Environmental Modeling and Software, 2003, 18(10):887-898.
- [19] 周军,张颖,高凤杰,等.阿什河流域农业非点源污染优先控制区域识别[J].水土保持研究,2013,20(3):180-184.
- [20] 胡连伍,王学军,罗定贵,等.基于 GIS 的流域非点源污染潜在风险区识别[J].水土保持通报,2007,27(3):107-115,110.
- [21] 张树文,王文娟,李颖,等.近 50 年来三江平原土壤侵蚀动态分析[J].资源科学,2008,30(6):863-849.
- [22] 王万忠,焦菊英.中国土壤侵蚀因子定量评价研究[J].水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [23] 傅世锋,查轩.基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J].地球信息科学,2008,10(3):390-395.
- [24] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses- A guide to conservation planning[M]. Agricultural Handbook No.537. Science and Education Administration, United States Department of Agriculture, 1978.
- [25] 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.
- [26] 李苗苗,吴炳芳,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.
- [27] 钱秀红,徐建民,施加春,等.杭嘉湖水网平原农业非点源污染的综合调查与评价[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2002,28(2):147-150.

(责任编辑:王育花)