

京津水源区小流域土壤侵蚀及其空间分异

江青龙¹, 谢永生^{1,2}, 张应龙¹, 张义¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对京津水源区生态环境脆弱, 水土流失空间分异大, 突发性强等问题, 选择河北省滦平县西北沟小流域为研究对象, 利用气候、土壤、地形、土地利用及植被盖度等数据, 运用 GIS 和 RUSLE 的方法对小流域土壤侵蚀强度及其空间分异特征进行了研究。结果表明, 流域多年平均侵蚀模数为 3 816. 835 t/(km² · a), 属中度侵蚀; 潜在侵蚀模数为 31 583. 150 t/(km² · a), 是现实侵蚀模数的 8. 28 倍; 不同土地利用方式中, 零星分布的大坡度坡耕地侵蚀强度最大, 其次为高度风化, 坡度较大的退化荒草地, 退化荒草地面积占流域总面积的 59. 38%, 侵蚀量占总量的 88. 48%, 是最主要的泥沙来源地; 不同坡度土壤侵蚀强度随坡度加大而显著增加, 流域坡度 > 25° 的面积约占流域总面积的 1/3, 侵蚀量约占 2/3; 不同坡向的土壤侵蚀空间分异也十分明显, 表现为正阳坡 > 半阳坡 > 半阴坡 > 正阴坡 > 平地。

关键词: 京津水源区; 地理信息系统(GIS); 修正通用水土流失方程(RUSLE); 土壤侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0249-07

中图分类号: S157. 1

Soil Erosion and Its Spatial Differentiation of a Small Watershed in Water Source Areas of Beijing City and Tianjin City

JIANG Qing-long¹, XIE Yong-sheng^{1,2}, ZHANG Ying-long¹, ZHANG Yi¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the water source areas of Beijing City and Tianjin City, ecological environment is highly fragile, and soil and water loss often exhibits strong spatial variability and occurs unpredictably. Along with data of climate, soil, terrain, land use and vegetation coverage, soil erosion and its spatial differentiation were studied based on the revised universal soil loss equation (RUSLE) model and geographic information system (GIS), in Xibeigou watershed of Luanping County, Hebei Province. The results show that the annual average rate of soil erosion was 3 816. 835 t/(km² · a), classified as middle-grade erosion. Annual average of potential soil erosion was 31 583. 15 t/(km² · a), about 8. 28 times of the former. Meanwhile, soil loss was obviously spatially differentiated. Among different land uses, sporadically distributed farmlands with steep slopes had the strongest soil erosion intensity, and next to it was highly weathered and degraded grassland's, which accounts for 59. 38% of the total area of the watershed and 88. 48% of the total sediment as the main source of the soil loss. With the increasing slope, the soil erosion intensity increased markedly. Approximately one third of the total area of this region has a slope degree higher than 25°, while this proportion contributed two third of soil loss. Soil losses also differed among lands of various aspects, as in order of sunny slope > half-sunny slope > half-shady slope > shady slope > flatland.

Keywords: water source areas of Beijing City and Tianjin City; geographic information system(GIS); revised universal soil loss equation(RUSLE); soil erosion

土壤侵蚀是世界上的主要灾害之一, 它破坏土地资源, 造成河道淤积, 加大了干旱、洪涝等灾害发生概 率, 引起生态环境的恶化, 严重影响人类的生存和发展, 成为各国普遍关注的问题^[1]。通过对区域内土壤

收稿日期: 2010-06-06

修回日期: 2010-07-29

资助项目: 水利部公益性行业专项经费项目“冀北山区生态输水小流域治理模式与关键技术”(200901051); 中国科学院知识创新工程重大项目“耕地保育与持续高效现代农业试点工程”(KSCX-YW-09-07); 国家科技支撑计划项目(2006BAD09B10); 中国科学院农业项目(kscx2-yw-N-46-04); 国家科技支撑计划项目(2006BAD15B01-03)

作者简介: 江青龙(1985—), 男(苗族), 湖北省宣恩县人, 硕士研究生, 从事 GIS 与水土保持研究。E-mail: gisfresher@nwsuaf.edu.cn.

通信作者: 谢永生(1960—), 男(回族), 河南省开封市人, 研究员, 从事土地资源及环境评价等方面研究。E-mail: ysxie@ms.iswc.ac.cn.

侵蚀量及其强度进行定量评估,分析土壤侵蚀空间分布特征,无疑对因地制宜采取高效措施保持水土,减少土壤侵蚀具有重要指导意义。目前,修正通用水土流失方程(revised universal soil loss equation,简称 RUSLE)是世界上应用较为成熟的一个水蚀预报经验模型,将其与 GIS 技术相结合,能够更加有效地对土壤侵蚀进行定量研究,其预报结果也更加形象直观^[2]。因此,结合二者对土壤侵蚀进行定量研究已经成为合理规划、利用区域水土资源的有效手段,并在国内外得到了广泛的应用和研究^[3-9]。

京津水源区主要位于张家口和承德地区,地处内蒙古高原与华北平原过渡地带和滦河水系上游。该区域生态脆弱,水土流失空间分异大,突发性强,危害严重等已成为该区域的头号生态问题。同时,在 2008 年中华人民共和国环境保护部发布的《全国生态功能区划》中,该区被划为“极重要水源涵养区”。目前只有少数研究者对北京密云水库整个流域水土流失做了水土流失模拟预测^[7,10],而针对小流域的土壤侵蚀研究较少。小流域既是生产生活的主要区域,又是水土保持规划与生态环境建设的基本单元。因此,本文选择河北省滦平县西北沟小流域为研究对象,运用 RUSLE 并借助 GIS 技术,对土壤侵蚀进行定量评估分析,并分析其空间分异特征,以期对京津水源区水土保持规划、生态环境建设以及水土资源的合理利用提供科学支持。

1 研究区概况

滦平县地理坐标为 40°39′—41°16′N,116°40′—117°53′E,位于承德市西南部,东邻承德县,北靠丰宁、隆化 2 县,西部与南部与北京市接壤,全县总面积 3 213 km²,辖 22 个乡镇,总人口 32.7 万人。西北沟小流域位于河北省滦平县虎什哈镇西北沟村,包括猪窝铺、马寨、半沟 3 个自然村,小流域总面积为 9.311 km²,海拔在 403~906 m,属于海河水系中潮河的 2 级支流;小流域地貌类型以土石山地为主,地势西高东低,地层结构复杂,部分山丘岩石裸露,风化严重,容易造成泥石流、崩塌等重力灾害;区内土壤以粗骨土、褐土、棕壤以及潮土等土类为主(依据中国土壤分类系统,1992),植被类型以温带针叶阔叶混交林为主,小流域内主要的土地利用现状为林地、退化荒草地、耕地以及建筑用地等;气候类型为北温带半湿润半干旱大陆性季风气候,区内最低气温 -28℃,最高气温 39℃,年平均气温 7.2℃,年均日照数 2 815 h,无霜期为 145 d,多年平均降雨量为 550 mm,10 年一遇 6 h 降雨量为 63 mm,24 h 降雨量为 120 mm,20

年一遇 6 h 降雨量为 94 mm,24 h 降雨量为 140 mm,降雨时空分布不均,且年际、年内变化大。降雨主要集中在汛期 6—9 月,占全年降雨量的 80%,年平均径流深度为 102 mm。该流域的地形、地貌、植被以及气候等在京津水源区都具有广泛的代表性。

2 研究方法

2.1 模型选择

本研究采用 RUSLE 来预测评估滦平县西北沟小流域土壤侵蚀。RUSLE 是由美国农业部农业研究局(USDA-ARS),在 Wischmeier 等人提出的通用水土流失方程基础之上,进行改进之后得到的一个水蚀预报经验模型。它合并了经验公式和一些基于过程的程序,也使 USLE 数据库的利用更为优化。同时,它的因子也分成更细的子因子,使其具有更高的准确度,从而使土壤流失量的计算更为可行,计算结果精度更高,因此被广泛用于估算各种区域农耕地中的溅蚀、片蚀、细沟侵蚀以及灌木林地和林地的水蚀量。其模型公式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

式中: A ——年平均土壤流失量 $[(t)/(hm^2 \cdot a)]$;
 R ——降雨侵蚀因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$;
 K ——土壤可蚀性因子 $[(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)]$;
 L ——坡长因子(无量纲);
 S ——坡度因子(无量纲);
 C ——覆盖与管理因子(无量纲);
 P ——水土保持措施因子(无量纲)。

2.2 RUSLE 各因子值的确定

2.2.1 降雨侵蚀因子 R 的估算 降雨侵蚀力因子 R 是一项评价降雨引起的土壤分离和搬运的动力指标,反映了降雨对土壤侵蚀的潜在能力^[8]。其经典算法是 Wischmeier 等于 1958 年提出的 EI_{30} 算法。但由于该算法需要详细的雨量和雨强资料,因此很难实现。后来 Wischmeier 又根据实际的需要提出了一个直接利用多年平均降雨量和多年月平均降雨量计算降雨侵蚀力 R 的经验公式^[9]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[1.5 \times 1g(P_i^2/P) - 0.81881]}$$

式中: P_i ——月降雨量(mm); P ——全年平均降雨量(mm)。

由于流域面积不大,全流域采用一个 R 值。根据河北滦平县水利部门提供的西北沟小流域 2000—2008 年的降雨资料,通过经验公式计算得出降雨侵蚀因子 R 为 229.7 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$,计算结果与前人在该地区关于降雨侵蚀力因子 R 的研究结果非常吻合^[10]。

2.2.2 土壤可蚀性因子 K 值的估算 土壤可蚀性是指土壤遭受侵蚀的敏感程度,是土壤抵抗由降雨、径流产生的侵蚀能力的综合体现,也是表示土壤受侵蚀的潜在可能性。在相同条件下,土壤可蚀性(K 值)越大,土壤受侵蚀的潜在危险性越大,反之则越小。直接测定 K 值要求条件苛刻,一般用土壤性质推算土壤可蚀性因子 K 值。最常用的方法是 Wischmeier 提出的可蚀性诺谟图^[6,9]。可蚀性诺谟图需要土壤结构系数和渗透级别资料,而我国现有的土壤背景资料来自全国第二次土壤普查,这些资料很少,因此不宜使用此法。门明新等^[11]采用土壤侵蚀和生产力影响估算模型(erosion—productivity impact calculator,简称 EPIC)中发展了土壤可蚀性因子 K 值的估算方法,对河北省土壤可蚀性进行了估算研究。结合其研究成果及土壤类型等资料确定土壤可蚀性因子 K 值(表 1)。

研究中所涉及的土壤类型资料来自于滦平县 2007 年度京津风沙源治理工程水利建设项目实际调查数据。结合土壤图和土壤可蚀性 K 值在 ArcGIS 9.2 中生成 1:10 000 的土壤可蚀性因子图层。

表 1 西北沟小流域不同土壤可蚀性因子 K 值

| 土类 | K 值 | 土类 | K 值 |
|----|---------|-----|---------|
| 褐土 | 0.322 1 | 棕壤 | 0.240 2 |
| 潮土 | 0.340 1 | 粗骨土 | 0.181 1 |

2.2.3 坡长坡度因子(LS)的估算 坡长和坡度是决定坡面水流能量大小,影响径流和侵蚀的重要地貌因素。因此,坡长坡度因子(LS)用于衡量地形地貌对土壤侵蚀的影响,当坡度相同时,坡长越长,径流速度就越大,汇集的径流也越大,侵蚀力也越强。本研究基于 ArcGIS9.2 的空间分析模块,以 DEM 基础利用栅格像元的坡长算法计算坡长,如果将 DEM 的每一个栅格定义为坡面的一个坡段,则每一坡段的因子算法可写为:

$$L_{i,j} = \left[\left(\sum_1^i D_{i,j} / \cos\theta_{i,j} \right)^{1+m_{i,j}} - \left(\sum_1^{i-1} D_{i,j} / \cos\theta_{i,j} \right)^{1+m_{i,j}} \right] \cos\theta_{i,j} / (22.13^{m_{i,j}} \times D_{i,j})$$

$$L = (l/22.13)^m = [D/(22.13\cos\theta)]^m$$

式中: $L_{i,j}$ ——第(i,j)像元的坡长因子; $D_{i,j}$ ——沿径流方向第(i,j)像元坡长的水平投影距(m),即两相邻像元中心距; $\theta_{i,j}$ ——第(i,j)像元的坡度($^\circ$); $m_{i,j}$ ——第(i,j)像元的坡长指数; L ——坡长因子; l ——像元坡长; D ——像元坡长水平投影。每个像元有 8 个相邻像元,分别对应 8 个方向(东、南、西、北和东北、西北、西南、东南方向)。当像元坡向为东、

南、西、北时, $D_{i,j} = d$ (像元边长值);当像元坡向为东北、西北、西南、东南时, $D_{i,j} = \sqrt{2}d$,当像元为平地或者流域内最高点时 $D_{i,j} = 0.5d$ 坡长指数 $m_{i,j}$ 的取值与坡度有关,其范围如下:当 $\theta \geq 5.14^\circ$ 时, $m = 0.5$;当 $5.14^\circ > \theta \geq 1.72^\circ$ 时, $m = 0.4$;当 $1.72^\circ > \theta \geq 0.57^\circ$ 时, $m = 0.3$;当 $0.57^\circ > \theta$ 时, $m = 0.2$ ^[12-14]。

由于通用土壤流失方程允许计算的最大坡度为 10° 。而西边沟小流域坡度 $\geq 10^\circ$ 区域的占 83.69%,因此借鉴刘宝元对坡度在 9%~55% 的陡坡土壤侵蚀的研究,本研究坡度因子 S 的计算进行分段考虑,即缓坡采用 McCool 坡度公式,陡坡采用刘宝元的坡度公式^[15]:

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases}$$

研究所用的 DEM 是由滦平县 2007 年度京津风沙源治理工程水利建设项目提供的 1:10 000 地形图数字化后,在 ArcGIS 9.2 的空间分析模块下利用等高线先生成 TIN,然后再转化成栅格单元 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的 TINGrid,即 DEM。最后再提取像元坡向、坡度,并通过栅格运算,得到坡长因子及坡度因子。

2.2.4 覆盖与管理因子(C)和水土保持因子(P)的估算 RUSLE 中的覆盖与管理因子(C)是指有特定植被覆盖或田间管理土地上的土壤流失量与其它条件相同时裸露连续休闲地的土壤流失量之比,反映耕作和管理措施对土壤侵蚀率的影响。 C 因子由植被类型、植被覆盖度、轮作顺序以及管理措施等因素决定。 C 值与植被类型、植被覆盖度有关,当地面完全裸露时, C 值为 1;当地面植被很好时, C 值可取 0.001,当地面裸露休闲时可取 1。居民地主要为建筑用地,故 C 值取 0.001。本研究的 C 值是参考前人的研究成果^[7,16-17],并结合现场实地调查的土地利用现状及植被盖度得出的。

RUSLE 中水土保持措施因子定义为采用特定措施土地上的土壤流失量与顺坡种植的土壤流失量的比值,介于 0~1 之间。完全不发生侵蚀的地区取 0,而未采取任何保护措施的地区取 1。本研究认为建筑物相当于居民地所采取的保护水土的措施。依据滦平县 2007 年度京津风沙源治理工程水利建设项目在其建设过程中实际调查的水土保持与土地利用现状资料,并结合前人相关研究结果^[7,14-15] 确定 P 值,其值为表 2。同时在 ArcGIS9.2 中生成 1:10 000 的覆盖与管理因子(C 值)图层及水土保持因子图层(P 值)图层。

表 2 西北沟小流域不同土地利用现状的覆盖与管理因子(C)和水土保持因子值(P值)

| 土地利用类型 | 植被覆盖度/% | C 值 | P 值 | CP 值 |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 退化荒草地 | 10~40 | 0.320 0 | 1.000 0 | 0.320 0 |
| | 40~80 | 0.120 0 | 1.000 0 | 0.120 0 |
| | ≥80 | 0.025 0 | 1.000 0 | 0.025 0 |
| 乔木林地 | 65~80 | 0.024 9 | 1.000 0 | 0.024 9 |
| | ≥80 | 0.004 1 | 1.000 0 | 0.004 1 |
| 灌木林地 | 35~60 | 0.140 0 | 1.000 0 | 0.140 0 |
| | ≥60 | 0.040 0 | 1.000 0 | 0.040 0 |
| 果园 | 13~28 | 0.180 0 | 0.690 0 | 0.124 2 |
| 耕地 | — | 0.220 0 | 0.300 0 | 0.066 0 |
| 建筑用地 | — | 0.001 0 | 0.001 0 | 0.000 0 |

3 结果与分析

3.1 小流域土壤侵蚀强度

在 ArcGIS 9.2 中生成各个因子图层,并通过栅格乘法运算,获得土壤侵蚀空间分布图,然后依据水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)将土壤侵蚀空间图分类分级,获得土壤侵蚀分级空间分布图(见附图 9)。结果显示(表 3),西北沟全小流域面积为 9.311 km²,年侵蚀总量为 35 539.311 t,多年平均侵蚀模数为 3 816.917 t/(km²·a),属于中度

侵蚀,与前人的研究结果^[7,11]及区域调查研究结果都比较吻合,说明基于 GIS 和 RUSLE 对小流域土壤侵蚀进行预测是一种切实可行的方法和技术途径。从侵蚀分级结果可以看出轻度侵蚀以下的面积占西北沟小流域总面积的 56.18%,其侵蚀量仅占总侵蚀量的 12.83%,说明该小流域一半以上的地区水土流失程度较轻,因此在水土保持规划过程中,该部分应该弱化治理,以免在治理过程中产生新的水土流失;但是面积仅占 14.67%的极强烈侵蚀和剧烈侵蚀区域的侵蚀量却占侵蚀总量的 51.82%,说明小流域内水土流失量空间分异显著,局部区域水土流失相当严重,应当采取切实有效的措施,强化治理。同时中强度侵蚀面积占总面积的 29.15%,其侵蚀量也相当大,占总侵蚀量的 35.34%。综上所述,该流域中度侵蚀及其以上的地区面积不到总面积的 1/2,但侵蚀量却占 87.17%,这些区域应是水土流失治理的重点区域。

3.2 潜在土壤侵蚀

潜在的土壤侵蚀量是指在没有任何植被覆盖和水土保持措施的前提条件下的年土壤侵蚀量,即 $C=1, P=1$,主要反映所采取的侵蚀控制措施是否有效,以了解侵蚀高危险区的位置并辅助制定侵蚀防治措施。其方程为:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S$$

表 3 西北沟小流域不同侵蚀强度的侵蚀面积及土壤侵蚀量

| 侵蚀强度分级 | 平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) | 侵蚀面积/km ² | 占总面积百分比/% | 土壤侵蚀量/t | 占流域侵蚀量百分比/% |
|--------|---|----------------------|-----------|------------|-------------|
| 微度侵蚀 | <200 | 1.694 | 18.19 | 194.102 | 0.55 |
| 轻度侵蚀 | 200~2 500 | 3.537 | 37.99 | 4 367.250 | 12.29 |
| 中度侵蚀 | 2 500~5 000 | 1.667 | 17.91 | 5 920.960 | 16.66 |
| 强度侵蚀 | 5 000~8 000 | 1.047 | 11.25 | 6 640.340 | 18.68 |
| 极强烈侵蚀 | 8 000~15 000 | 0.954 | 10.25 | 10 109.700 | 28.45 |
| 剧烈侵蚀 | >15 000 | 0.412 | 4.42 | 8 306.959 | 23.37 |

通过模拟计算得到潜在平均侵蚀模数为 31 583.15 t/(km²·a),属于剧烈侵蚀,年侵蚀总量为 294 070.710 t,相当于现实情况下的 8.28 倍(表 4)。通过潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量的对比,可以看出合理的田间管理措施及水土保持措施对保持水土,减少水土流失具有非常重要的作用。依据实际调

查,该流域内坡耕地大多采用等高耕作,部分坡耕地边缘布设了少量的生物篱,对减少土壤侵蚀起到了很大作用;同时流域内存在畜牧业,主要放养山羊,而山羊对林地、草地等地表覆盖破坏能力特别大,如果不将放牧的区域和放牧数量加以控制,将对区域水土保持造成巨大威胁。

表 4 西北沟小流域潜在土壤侵蚀与现实土壤侵蚀比较

| 类型 | 侵蚀量/t | 平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) | 侵蚀强度 | 潜在土壤侵蚀量与现实土壤侵蚀量的比值 |
|--------|-------------|---|------|--------------------|
| 潜在土壤侵蚀 | 294 070.710 | 31 583.150 | 剧烈侵蚀 | 8.28 |
| 现实土壤侵蚀 | 35 539.311 | 3 816.917 | 中度侵蚀 | |

3.3 小流域土壤侵蚀空间分异特征

3.3.1 不同土地利用现状的土壤侵蚀空间分异 将西北沟小流域土地利用现状图和侵蚀强度图叠加分析,得到不同土地利用的侵蚀强度和侵蚀模数(表 5)。结果显示,不同的土地利用现状,土壤侵蚀强度分异显著;小流域内主要的土地利用类型是退化荒草地、耕地和乔木林,3 类合计占总面积的 87.04%,其侵蚀量占总侵蚀量的 91.9%。其中退化荒草地面积占总面积的 59.38%,但是侵蚀总量却达 88.48%,是主要的侵蚀来源,其侵蚀模数为 5 687.138 t/(km²·a),属于强度侵蚀;耕地和乔木林地约占流域总面积的 1/4,侵蚀量仅占总侵蚀量的 3.42%,属于轻度侵蚀。通过调查分析认为,导致退化荒草地水土流失的主要原因是:流域内随意放养山羊,致使地表植被遭到严重破坏,加上退化荒草地多处于坡度较大的地方,而且地表裸露风化严重,植被盖度大多在 20%左右,而且土壤类型以容易造成水土流失的粗骨土为主。灌木林多在阳坡,光照时间长,水分蒸发较快,植被生长困难,植被盖度都在 40%左右;果园都为坡地果园,有人为管理,大部分果树根部有树盘,因而侵蚀较轻;乔木林以油松等针叶林为主,几乎都在阴坡,而且植被盖度都在 80%左右,土壤侵蚀强度较轻。

表 5 西北沟小流域不同土地利用类型的土壤侵蚀状况

| 土地利用类型 | 侵蚀面积/km ² | 占总面积百分比/% | 侵蚀量/t | 占流域侵蚀量百分比/% | 平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) |
|--------|----------------------|-----------|------------|-------------|---|
| 退化荒草地 | 5.529 | 59.38 | 31 444.678 | 88.48 | 5 687.138 |
| 耕地 | 1.541 | 16.56 | 935.741 | 2.63 | 607.053 |
| 乔木林地 | 1.034 | 11.10 | 280.775 | 0.79 | 271.640 |
| 灌木林地 | 0.862 | 9.26 | 2 321.585 | 6.53 | 2 692.531 |
| 果园 | 0.223 | 2.39 | 553.694 | 1.56 | 2 488.277 |
| 建筑用地 | 0.122 | 1.31 | 2.840 | 0.01 | 23.341 |

表 6 西北沟小流域不同坡度的耕地土壤侵蚀状况

| 耕地坡度 | 侵蚀面积/km ² | 占总面积百分比/% | 侵蚀量/t | 占流域侵蚀量百分比/% | 平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) |
|---------|----------------------|-----------|---------|-------------|---|
| <8° | 0.899 | 58.33 | 158.323 | 16.92 | 176.110 |
| 8°~15° | 0.510 | 33.12 | 274.778 | 29.36 | 538.307 |
| 15°~25° | 0.108 | 7.00 | 310.340 | 33.17 | 2 873.519 |
| >25° | 0.024 | 1.55 | 192.300 | 20.55 | 8 012.500 |

3.3.2 不同坡度的土壤侵蚀空间分异 依据水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-60)将西北沟小流域坡度分级,得到其坡度分级图,并将坡度分级图与侵蚀强度图叠加分析,得到不同坡度土地的侵蚀量和侵蚀强度(表 7)。表 7 显示,随着坡度的增加,

同时将耕地与坡度图、土壤侵蚀强度图叠加分析,结果表明(表 6),坡度<8°的耕地占耕地总面积的 58.33%,侵蚀量却只占耕地总侵蚀量的 16.92%,侵蚀强度为微度,坡度在 8°~25°的耕地占耕地总面积的 40.12%,侵蚀量占耕地侵蚀总量的 62.53%,是耕地土壤侵蚀的主要来源。同时发现小流域内仍然存在>25°坡耕地上耕作的现象,虽然坡耕地面积仅占耕地总面积的 1.55%,但是侵蚀量却是耕地总侵蚀量的 20.55%,平均侵蚀模数达 8 012.500 t/(km²·a),属于极强度侵蚀。

实际调查也表明,西北沟小流域内耕地主要是坡度较小的平坝地,土壤侵蚀强度较轻,但是大面积坡耕地边缘地区仍然有零星分布的极少数耕地使用不合法,在坡度>25°地区开垦,导致大量土壤侵蚀。因此流域内水土保持的重点应该是放在退化草地和坡度较大的坡耕地,特别是坡度>25°的坡耕地的治理上,同时应该合理调整区内产业结构,开展清洁环保型产业建设。

从以上分析可以看出,零星分布的大坡度坡耕地侵蚀强度最大,为极强度侵蚀,其次为退化荒草地,属于强度侵蚀,然后为灌木林和果园,属于中度侵蚀,侵蚀强度较轻的为平耕地和乔木林地。

土壤侵蚀强度逐渐增大;坡度<25°和>25°的区域分别约占该流域总面积的 2/3 和 1/3,但侵蚀量的比例却恰好相反,分别约占侵蚀总量的 1/3 和 2/3;同时<25°的区域土壤侵蚀强度为 1 904.58 t/(km²·a),属于轻度侵蚀,而>25°的区域侵蚀强度都在强度侵蚀

以上,特别是 $>35^\circ$ 的区域为极强度侵蚀。这主要是因为坡度越陡,降雨产生的径流流速越大,侵蚀动力越强,加上坡度较大地区植被生长困难,地表裸露风化严重造成的。

3.3.3 不同坡向的土壤侵蚀空间分异 在 ArcGIS 9.2 中利用 DEM 生成坡向图,然后通过重分类,将区域分为正阴坡、半阴坡、正阳坡、半阳坡以及平地,然后通过叠加运算获得各个坡向土地的侵蚀量和侵蚀强度(表 8)。结果显示,正阳坡、半阳坡、正阴坡及半阴坡的侵蚀强度都属于中度侵蚀,但是正阳坡侵蚀强度明显大于正阴坡侵蚀强度,平地几乎不发生土壤侵

蚀;其强度大小关系具体表现为:正阳坡 $>$ 半阳坡 $>$ 半阴坡 $>$ 正阴坡 $>$ 平地。这主要是由于在半干旱地区,水分是限制植被生长最主要的因素,阳坡比阴坡接受光照的时间要长,水分蒸发量大,土壤含水量低,植被生长较困难,因而植被稀少,地表覆盖率低。调查发现,正阳坡和半阳坡主要为退化草地和植被盖度较低的灌木林地,植被类型有刺槐、山杏、荆条、以及黄被草、烟芦草等,植被盖度大部分在 20% 左右,正阴坡和半阴坡主要为乔木林地和灌木林地,植被类型以油松、柞树为主,而且植被盖度大部分都在 80% 左右。

表 7 西北沟小流域不同坡度土地的土壤侵蚀状况

| 坡度分级/ $^\circ$ | 侵蚀面积/ km^2 | 占总面积百分比/% | 侵蚀量/t | 占侵蚀总量百分比/% | 平均侵蚀模数/ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ |
|----------------|---------------------|-----------|------------|------------|---|
| <5 | 0.866 0 | 9.30 | 82.155 | 0.23 | 94.867 |
| 5~8 | 0.504 4 | 5.42 | 224.095 | 0.63 | 444.280 |
| 8~15 | 1.890 4 | 20.30 | 2 243.003 | 6.31 | 1 186.523 |
| 15~25 | 2.966 8 | 31.86 | 9 311.691 | 26.20 | 3 138.631 |
| 25~35 | 2.278 0 | 24.47 | 14 075.187 | 39.60 | 6 178.748 |
| >35 | 0.805 4 | 8.65 | 9 603.180 | 27.02 | 11 923.491 |

表 8 西北沟小流域不同坡向土地的土壤侵蚀强度及平均侵蚀模数

| 坡向 | 侵蚀面积/ km^2 | 占总面积百分比/% | 侵蚀量/t | 占侵蚀总量百分比/% | 平均侵蚀模数/ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ |
|-----|---------------------|-----------|-----------|------------|---|
| 正阳坡 | 2.176 6 | 23.38 | 9 819.648 | 27.630 | 4 511.462 |
| 半阳坡 | 2.507 2 | 26.93 | 9 741.301 | 27.410 | 3 885.331 |
| 半阴坡 | 2.312 4 | 24.84 | 8 450.878 | 23.780 | 3 654.592 |
| 正阴坡 | 2.192 8 | 23.55 | 7 526.297 | 21.180 | 3 432.277 |
| 平地 | 0.122 0 | 1.31 | 1.187 | 0.003 | 9.730 |

4 结论

结合 GIS 和 RUSLE 对滦平县西北沟小流域土壤侵蚀进行模拟,得到小流域多年平均侵蚀模数为 $3\ 816.917 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,属于中度侵蚀,年侵蚀总量为 $35\ 539.311 \text{ t}$,模拟结果比较理想,说明基于 GIS 和 RUSLE 对小流域土壤侵蚀量进行预测是一种可行的方法和技术途径,能够为区域的水土资源合理利用及水土保持规划提供科学支持。

通过模拟预测得西北沟小流域潜在侵蚀模数为 $31\ 583.15 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,属于剧烈侵蚀,年侵蚀量为 $294\ 070.710 \text{ t}$,相当于正常情况下的 8.28 倍,因此必须采取切实有效的措施开展水土保持治理,同时优化区域内产业结构,发展清洁环保型产业。

小流域内水土流失空间分异大,不同土地利用现状、不同坡度以及不同坡向的水土流失状况都存在显著差异。表现为:在耕地边缘地区零星分布的少量大

坡度坡耕地侵蚀强度最大,为极强度侵蚀;其次为退化荒草地,属于强度侵蚀,其面积占流域总面积的 59.38%,侵蚀量占总量的 88.48%,是最主要的泥沙来源地;然后为灌木林地和果园,属于中度侵蚀;侵蚀强度较轻的为平耕地和乔木林地。流域坡度 $>25^\circ$ 的面积约占流域总面积的 1/3,侵蚀量约占 2/3;不同坡向的土壤侵蚀强度分异也十分明显,主要表现为:正阳坡 $>$ 半阳坡 $>$ 半阴坡 $>$ 正阴坡 $>$ 平地。

[参 考 文 献]

- [1] 刘秉正,吴发启.土壤侵蚀[M].西安:陕西人民出版社,1997.
- [2] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based universal soil loss model[J]. Agricultural Systems, 2003, 76: 883-894.
- [3] Wang G X, Gertner G, Singh V, et al. Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the re-

- vised universal soil loss equation: A case study of the rainfall-runoff erosivity R factor[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 153:143-155.
- [4] Onori F, Bonis P D, Grauso S. Soil erosion prediction at the basin scale using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a catchment of Sicily (Southern Italy) [J]. *Environmental Geology*, 2006, 50(8):1129-1140.
- [5] Nyakatawa E Z, Reddy K C, Lemunyon J L. Predicting soil erosion in conservation tillage cotton products systematic using the revised universal soil loss equation (RUSLE) [J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 57: 213-224.
- [6] 秦伟, 朱清科, 张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 157-163.
- [7] 于洋, 王晓燕, 欧洋. 基于 GIS 的 RUSLE 模型在密云水库流域的应用[J]. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 30(4): 63-68.
- [8] 许月卿, 邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 67-71.
- [9] 杨娟, 葛剑平, 李庆斌. 基于 GIS 和 USLE 的卧龙地区小流域土壤侵蚀预报[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, 46(9): 1526-1529.
- [10] 欧洋, 王晓燕, 郑玉涛, 等. 密云水库流域降雨径流侵蚀力时空分布研究[J]. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(4): 74-78.
- [11] 门明新, 赵同科, 彭正萍, 等. 基于土壤粒径分布模型的河北省土壤可蚀性研究[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(11): 1647-1653.
- [12] 周为峰, 吴炳方. 基于遥感和 GIS 的密云水库上游土壤侵蚀定量估算[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 46-50.
- [13] 卜兆宏, 唐万龙, 潘贤章. 土壤流失量遥感监测中 GIS 像元地形因子算法研究[J]. *土壤学报*, 1994, 31(3): 321-329.
- [14] Robert Hickey. Slope angle and slope length solutions for GIS[J]. *Cartography*, 2000, 29(1): 1-14.
- [15] 黄金良, 洪华生, 张路平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 75-79.
- [16] 王万中, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(5): 2-19.
- [17] 贺然, 王棒, 朱国平, 等. 密云水库北京集水区土壤侵蚀预测[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(S): 579-582.

(上接第 168 页)

- [3] 邹君. 湖南省水资源可持续利用综合评价研究[J]. *节水灌溉*, 2007(2): 18-21.
- [4] 麻荣永, 郑二伟, 王魁, 等. 基于主成分分析法的广西水资源可持续利用综合评价[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 70-73.
- [5] 刘丹丹, 宋松柏. 陕北地区水资源可持续利用评价[J]. *干旱地区研究*, 2008, 26(4): 254-258.
- [6] 高建颖, 赵德奎. 天津市水资源可持续利用评价[J]. *地下水*, 2007, 29(3): 1-3.
- [7] 陈守煜. 区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J]. *中国工程科学*, 2001, 3(2): 33-38.
- [8] 胡会亮, 齐实, 张广焰. 山西省水资源可持续利用评价[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(22): 9661-9663.
- [9] 王汝发, 王汝涛. 水资源可持续利用的评价模型[J]. *统计与决策*, 2008, 12(14): 60-61.
- [10] 李柞泳, 张辉军, 邓新民. 密切值法用于环境质量的比较[J]. *环境科学研究*, 1992, 5(4): 15-17.
- [11] 杨文海, 王丽芳, 王坤, 等. 改进密切值法在水环境质量评价中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2005, 16(2): 69-71.
- [12] 何东进, 洪伟. 多目标决策的密切值法及其应用研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2001, 17(2): 96-98.
- [13] 任力锋, 王一任, 张彦琼, 等. TOPSIS 法的改进与比较研究[J]. *中国卫生统计*, 2008, 25(1): 64-66.
- [14] 杨明, 孙雪花, 远亚丽. 改进的 TOPSIS 在公路网规划方案选择中的应用[J]. *铁路运输与经济*, 2008, 30(6): 76-78.