

京津水源区小流域土壤侵蚀空间模拟^{*}

江青龙¹ 谢永生^{1,2,*} 张应龙¹ 张怀³ 郝晓东³

(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;

³ 承德市水土保持科学研究所, 河北承德 067000)

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,以河北省平泉县东北沟典型小流域为例,采用 GIS 技术与 CSLE 模型对其土壤侵蚀进行二维空间模拟及侵蚀规律研究,并对模型模拟精度进行验证。结果表明:模型确定性系数 >0.85 ,模拟结果可信度高;小流域侵蚀模数为 $2359.24 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,属于轻度侵蚀,侵蚀主要源于 15° 以上坡面,占侵蚀总量的 92.1%;土壤侵蚀模数随坡度先逐渐增加,当坡度 $>45^\circ$ 时,土壤侵蚀模数有减小的趋势;土壤侵蚀模数空间异质性显著,坡耕地侵蚀模数最大,为 $6112.90 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;荒草地占总面积 33.2%,侵蚀量却达总量的 74.9%;59.3%的侵蚀来自阳坡和半阳坡,而阴坡半阴坡仅占流域侵蚀量的 16.2%。研究为利用 CSLE 模型对小流域土壤侵蚀进行空间模拟提供技术范例,为京津水源区土壤侵蚀规律研究及水土保持生态建设提供科学参考。

关键词 土壤侵蚀规律; 地理信息系统(GIS); 中国水土流失模型(CSLE); 空间模拟

中图分类号 S157.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2011)8-1703-09

Soil erosion in a small watershed in water source areas of Beijing and Tianjin: Spatial simulation. JIANG Qing-long¹, XIE Yong-sheng^{1,2,*}, ZHANG Ying-long¹, ZHANG Huai³, HAO Xiao-dong³ (¹College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Institute of Soil and Water Conservation of Chengde in Hebei Province, Chengde 067000, Hebei, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1703-1711.

Abstract: Aiming at the fragile ecological environment and the strong spatial variability and unpredictable occurrence of soil and water loss in the water source areas of Beijing and Tianjin, a case study was conducted on the soil erosion pattern and its modulus in the Dongbeigou watershed in Pingquan County of Hebei Province by using geographic information system (GIS) and Chinese Soil Loss Equation (CSLE), and the simulation precision of the CSLE was tested. The CSLE had a coefficient of determination higher than 0.85, being highly credible, and the watershed had a soil erosion modulus $2359.24 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, belonging to light degree erosion. 92.1% of the total soil loss came from the areas with a slope $>15^\circ$. The soil erosion modulus increased gradually with slope, but showed a decreasing trend when the slope was $>45^\circ$. A highly spatial heterogeneity was observed in the soil erosion modulus, being the highest ($6112.90 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) for sloping cropland. Degraded grassland occupied 33.2% of the total area, but its soil erosion amount accounted for 74.9% of the total. 59.3% of soil erosion was from sunny and half-sunny slopes, and only 16.2% of it came from shady and half-shady slopes. This study provided a technical basis for applying CSLE to assess the soil erosion in the water source areas of Beijing and Tianjin, and offered scientific reference for the soil and water conservation in the region.

Key words: soil erosion pattern; geographic information system (GIS); China Soil Loss Equation (CSLE); spatial simulation.

* 中国科学院知识创新重大项目(KSCX-YW-09-02, KSCX-YW-09-07)、水利部公益性行业科研专项经费项目(200901051、201001036)和国家科技支撑计划项目(2011BAD31B01)资助。

** 通讯作者 E-mail: ysxie@ms.iswc.ac.cn

收稿日期: 2011-01-05 接受日期: 2011-04-25

土壤侵蚀是全球重大环境问题之一,严重地威胁着人类的生存与发展,成为各国普遍关注的问题。针对土壤侵蚀的定量研究,目前主要围绕土壤侵蚀模型进行,它是进行土壤侵蚀监测和预报定量研究的重要工具(罗红等,2010)。近30年来,世界各国在集中人力和物力开发侵蚀预报模型的同时,尤其注重土壤侵蚀物理过程和概念模型的研究,并取得了大量创新性的成果,先后开发了USLE/RUSLE(Wischmeier & Smith,1978)、WEPP(Nearing *et al.*,1989)和LISEM(de Roo,1996)等模型。从20世纪40年代我国就开始了土壤侵蚀的定量化研究,刘善建(1953)根据径流小区观测资料,首次提出了坡面年侵蚀量的计算公式,揭开了我国土壤侵蚀的定量化研究的序幕。同时朱显谟(1960)、黄秉维(1953)等对土壤侵蚀类型、特征、影响因素及分布区域的深入研究,为土壤侵蚀的定量研究奠定了基础。随着20世纪70年代美国通用水土流失方程(USLE)引入中国,根据美国通用土壤流失方程的基本思路和原理,我国土壤侵蚀学者和地理学家对土壤侵蚀影响因子做了大量研究,并取得了丰硕的成果(张光辉,2002)。其中,江忠善等(1996)对降雨特性与侵蚀间关系的研究、Liu(2000)对坡度坡长因子的研究、王万忠和焦菊英(1996)对降雨侵蚀力的研究具有较好的代表性,同时也提出了一些的土壤侵蚀模型。其中具有代表性的是Liu等(2002)基于美国的通用水土流失方程建立的适合中国土壤侵蚀特征的中国水土流失方程(CSLE-Chinese Soil Loss Equation),可以用于计算坡面上多年平均年土壤流失量,此模型确立了一个中国土壤侵蚀预报模型的基本形式,能够更加准确的预报坡度较大的区域,形式简单实用,非常容易在不同地区推广应用。目前已有夏建国等(2006)利用CSLE对川西低山区名山县的蒙山的一个4.91 km²的阳坡坡面进行土壤侵蚀定量分析,并结合分析结果对因土壤侵蚀而造成的经济损失进行了计算;Xu等(2008)利用CSLE对黑龙江宾县土壤侵蚀进行了模拟分析,程琳等(2009)对陕西省土壤侵蚀进行了定量评价。但是当前国内该模型的应用还不是很成熟,而且应用在小流域的土壤侵蚀定量研究的相关报道非常少,同时以上研究对模型及其参数的正确性与模拟精度都没有做出很好的说明,这也是研究有待深入的地方。

京津水源区主要位于张家口东南部和整个承德地区,地处内蒙古高原和华北平原过渡地带,潮白河

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,因此对该区域土壤侵蚀模拟预报以及侵蚀规律研究是非常有必要的。本研究基于GIS空间分析与统计技术,将CSLE模型应用于京津水源区的典型小流域进行土壤侵蚀二维空间模拟,并利用分析结果对小流域土壤侵蚀空间分异规律进行研究;同时选用京津水源区不同土地利用类型的径流小区观测资料对模型模拟精度进行检验。因而,本文一是验证CSLE模型模拟的精度,为模型能否在该区域使用提供科学的支持,二是在二维空间上模拟出小流域土壤侵蚀状况,为京津水源区的小流域水土保持生态环境建设提供参考和依据。

1 研究区概况

东北沟小流域(118°33′9″E—118°37′9″E,41°3′7″N—41°6′19″N)位于平泉县西部,隶属王土坊乡,属燕山山脉中低区,包括东沟和北沟2条沟组成,流域总面积为19.396 km²,海拔在593~1179 m,属于流入潘家口水库的滦河水系。该流域地貌类型为土石低山,气候类型暖温带大陆性季风气候,年平均气温7.1℃,无霜期135 d,多年平均降雨量为540.8 mm,约80%集中在6—9月。土壤类型主要为棕壤、褐土、黄绵土、粗骨土、石质土以及新积土等;流域内木本植物有油松(*Pinus tabulaeformis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、杨树(*Populus tomentosa*)、榆树(*Ulmus pumila*)等,草本植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、乌拉草(*Carex meyeriana*)。小流域内有一个行政村,包括13个自然村,共有310户,1100口人,劳动力有690人。

东北沟小流域在地貌、气候、土壤、植被类型等方面在该区域都具有广泛代表性,属于京津水源区的典型小流域,并于1991年被列为滦河重点治理工程项目区。

2 数据来源

降雨资料是由平泉县气象局提供的离东北沟小流域最近的气象站(平泉县县城气象站)1980—2009年29年间的月降雨资料,用于计算降雨侵蚀力;土壤类型是基于2009年QuickBird全色波段遥感影像(空间分辨率为0.61 m)与小流域流域

表1 五道沟径流小区基本资料

Table 1 Basic information of Wudaogou runoff plots

小区原始编号	坡度	坡长(m)	面积(m ²)	土壤类型	小区地表覆盖情况
林-1	23°50′	14.9	57.5	棕壤	油松林地 植被盖度 50%
林-2	29°37′	11.22	49	棕壤	油松林地 植被盖度 50%
林-3	33°10′	10	32.8	褐土	荒草坡 植被盖度 55%
林-4	36°26′	25.86	89.2	棕壤	油松林地 植被盖度 50%
林-5	34°45′	7.2	22.9	褐土	荒草坡 植被盖度 50%
林-6	33°56′	23.2	69.8	棕壤	油松林地 植被盖度 50%
林-7	29°21′	18.25	64.2	棕壤	刺槐林地 植被盖度 70%
林-9	28°35′	11.98	31.7	褐土	荒草坡 植被盖度 45%
耕-1	29°11′	19.8	110.5	褐土	坡耕地, 平作种植玉米
耕-3	11°42′	10.33	49.7	褐土	坡耕地, 平作种植玉米
耕-4	15°05′	10.43	50.1	褐土	坡耕地, 平作种植玉米
耕-5	19°11′	10.92	51.6	褐土	坡耕地, 平作种植玉米
耕-6	18°56′	10.91	51.6	褐土	坡耕地, 平作种植玉米
耕-7	18°06′	10.93	51.8	褐土	坡耕地, 平作种植玉米

表2 南山径流小区基本资料

Table 2 Basic information of Nanshan runoff plots

小区原始编号	坡度	坡长(m)	面积(m ²)	土壤类型	小区地表覆盖情况
1-3	27°38′	11.48	50.4	褐土	刺槐林地 植被盖度 80%
1-4	29°14′	12.08	52.4	褐土	刺槐林地 植被盖度 20%
1-5	30°07′	12.75	54.9	褐土	刺槐林地 植被盖度 75%
1-7	28°32′	11.09	48.5	褐土	草地 水平阶整地 种植沙打旺 植被盖度 90%
1-9	22°58′	11.95	55	褐土	草地 平作种植沙打旺 植被盖度 40%
1-10	23°30′	11.95	54.8	褐土	草地 平作种植沙打旺 植被盖度 60%
1-11	23°18′	11.89	54.5	褐土	草地 平作种植沙打旺 植被盖度 60%
1-13	24°28′	11.79	53.6	褐土	草地 平作引种美洲草 植被盖度 40%
1-15	18°11′	11.6	54.9	褐土	荒草坡、水平阶整地 植被盖度 25%
1-16	18°23′	11.6	54.7	褐土	荒草坡 植被盖度 80%
1-17	16°17′	11.6	55.7	褐土	荒草坡、鱼鳞坑整地 植被盖度 65%

1:10000大比例尺地形图,通过实地详查勘测调绘制而成,并针对每种土壤类型下不同土地利用类型进行均匀布点采样,最终全流域一共采集34个样本,然后分析土壤样品的机械组成与有机质含量,用于计算土壤可蚀性因子;购买由等高距为5m的等高线插值生成的比例尺为1:10000,栅格大小为5m×5m的大比例尺的DEM,用于坡度坡长因子及耕作措施因子的计算;由QuickBird高清影像,初步勾勒小流域土地利用现状图,并由实地一一校对,同时现场测定每个斑块植被盖度,用以计算生物措施因子;依据平泉县水保局提供的《河北省平泉县东北沟流域水土保持综合治理规划》(1991年)及现场调查工程措施保存损毁资料计算工程措施因子。

用于对模型精度进行检验的径流小区观测数据是承德市五道沟径流场(表1)和南山径流场(表2)1983—1985年的降雨及侵蚀观测数据(部分小区因

数据记录不全而未采用)。观测期间采用自记雨量计记录降雨情况;使用蓄水池测量径流小区的径流量,用取样桶采集泥沙样品,将蓄水池的泥沙水量充分搅拌均匀混合后取样,过滤,烘干称重,测量径流小区的侵蚀量。

3 研究方法

本研究采用中国土壤侵蚀预报模型(CSLE)进行土壤侵蚀的定量分析,其模型如下:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T$$

式中: A 为年单位面积的土壤侵蚀量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h \cdot a^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$); L 为坡长因子(无量纲); S 为坡度因子(无量纲); B 为生物措施因子(无量纲); E 为工程措施因子(无量纲); T 为耕作措施因子(无量纲)。

3.1 降雨侵蚀力因子

本研究采用多年平均降雨量和多年月平均降雨量计算降雨侵蚀力因子 R ,其经验公式如下(杨娟等 2006) :

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[1.5 \times \lg(P_i^2/P) - 0.8188]}$$

式中: P_i 为月降雨量 (mm); P 为全年平均降雨量 (mm)。

东北沟小流域面积小,降雨空间异质性小,故统一采用最近雨量站(平泉县县城气象站)近29年的月降雨数据,最终计算得降雨侵蚀力因子为 $159.638 \text{ MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.2 土壤可蚀性因子

本研究土壤可蚀性因子 K 值的获取是通过实地采样分析土壤机械组成及有机质含量,结合 Williams 等(1983)在 EPIC 模型中的算法进行估算。其估算公式如下:

$$K = \{ 0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 S_d(1 - S_i/100)] \} \times [S_i / (C_1 + S_i)]^{0.3} \times \{ 1.0 - 0.25C / [C + \exp(3.72 - 2.95C)] \} \times [1.0 - 0.7(1 - S_d/100)] / \{ 1 - S_d/100 + \exp[-5.51 + 22.9(1 - S_d/100)] \}$$

式中: S_d 为砂粒含量; S_i 为粉粒含量; C_1 为粘粒含量; C 为有机质含量。

通过计算得不同土壤可蚀性因子 K 值: 褐土为 $0.237 \text{ t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$,棕壤为 $0.172 \text{ t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$,粗骨土为 $0.302 \text{ t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$,新积土为 $0.154 \text{ t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$,石质土为 $0.172 \text{ t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$,黄绵土为 $0.332 \text{ t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。并做得土壤可蚀性因子 K 值(图1)。

3.3 坡长坡度因子

根据刘宝元等(2000a,2002b)的研究结果,采用下式计算因子 LS 值:

$$L = (\lambda / 22.1)^m$$

式中: λ 为坡长; m 为坡长指数 ($m=0.2, \theta \leq 1^\circ$; $m=0.3, 1^\circ < \theta \leq 3^\circ$; $m=0.4, 3^\circ < \theta \leq 5^\circ$; $m=0.5, \theta \geq 5^\circ$)

$$S = \begin{cases} 10.9 \sin \theta + 0.03 & \theta \leq 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ < \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases}$$

本文采用基于 AML 编程语言,采用最大溯源径流路径法计算坡长,该算法,简单易懂,易为广大

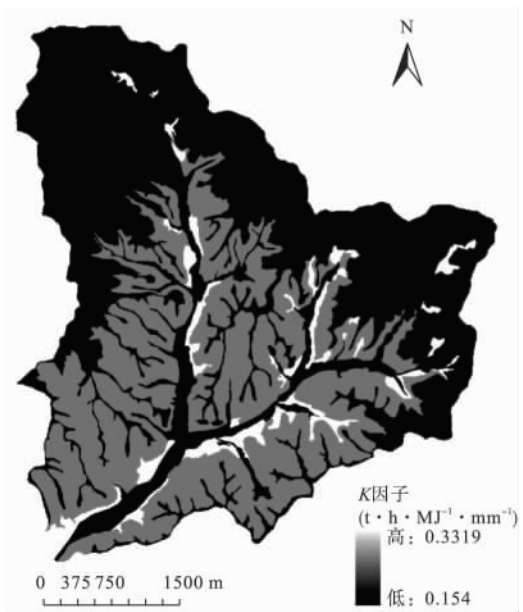


图1 土壤可蚀性因子 K 分布示意图
Fig.1 Distribution of soil erodibility factor

GIS 用户接受。其计算原理及实现过程参见罗红等(2010)和 Hickey 等(1994,2000)研究成果。

3.4 水土保持措施因子

CSLE 将水土保持措施因子区分为生物措施因子 B 、工程措施因子 E 和耕作措施因子 T 。其中生物措施因子 B 和耕作措施因子 T 估算如表3和表4(程琳等 2009)。工程措施因子 E 的估算采用如下公式(谢红霞等 2010):

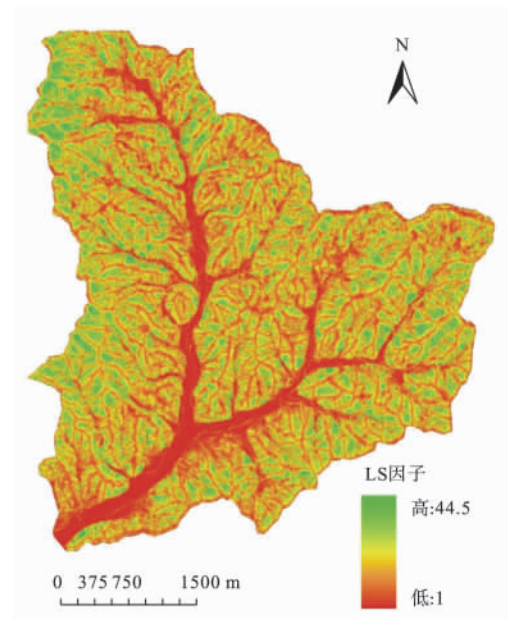


图2 坡长坡度因子 L 、 S 分布示意图
Fig.2 Distribution of terrain factor

$$E = (1 - \frac{S_t}{S} \times \alpha) (1 - \frac{S_d}{S} \times \beta)$$

式中 S_t 为梯田的面积, S_d 为淤地坝的控制面积, S 为土地的总面积, α 、 β 分别为梯田和淤地坝的减沙系数, 分别为 0.764 和 1。通过对流域的土地利用现状资料, 得出该小流域有梯田面积为 44.28 hm^2 , 无淤地坝工程。因而计算得工程措施因子 E 值为 0.983。3 个因子通过栅格运算得到结果如图 3。

4 模型的验证

本研究借鉴毕小刚等(2006)的研究方法, 选用

表 3 不同土地利用类型的生物措施因子

Table 3 Biological measure factor for different land use types

土地利用类型	植被盖度 (%)	B 值	土地利用类型	植被盖度 (%)	B 值
林地	0~20	0.100	草地	0~20	0.450
	20~40	0.080		20~40	0.240
	40~60	0.060		40~60	0.150
	60~80	0.020		60~80	0.090
	80~100	0.004		80~100	0.043
水域	-	0	坡耕地	-	0.476
建筑用地	-	0.353	平耕地	-	0.230

表 4 不同坡度下耕作措施因子 T 值

Table 4 Tillage measure factor for different slopes

坡度 (°)	≤1	1~3	3~9	9~13	13~17	17~21	21~25	>25
T 值	0.74	0.59	0.60	0.62	0.68	0.75	0.81	0.92

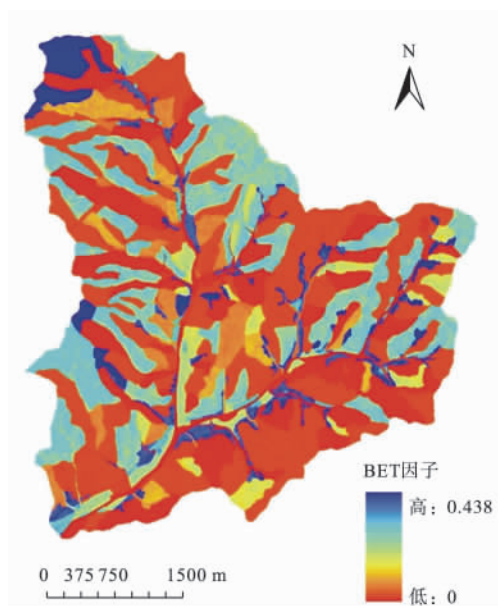


图 3 水土保持措施因子分布示意图
Fig. 3 Distribution of soil and water conservation measure factor

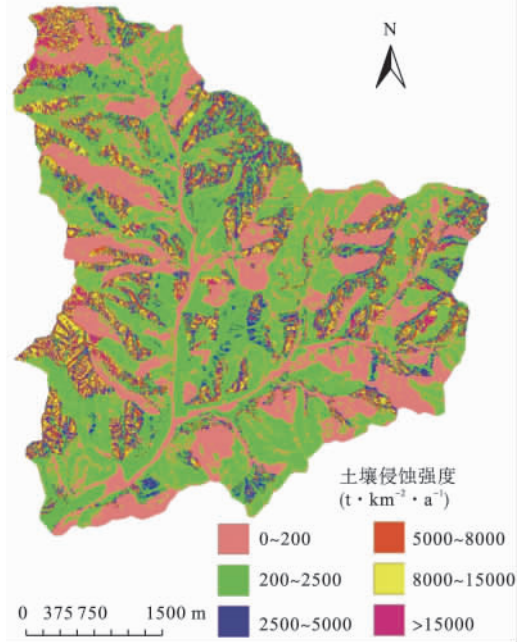


图 4 小流域土壤侵蚀强度分级示意图
Fig. 4 Distribution of soil erosion grade in Dongbeigou watershed

径流小区来验证模型模拟精度。为了客观评价 CSLE 模拟计算的合理性, 选用模型确定性系数 E_f 这一指标来评价土壤流失方程预测结果的精度, 该指标由 Nash 和 Sutcliffe(1970) 提出, 用以评价计算值和实测值的接近程度。计算式为:

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_o - R_c)^2}{\sum (R_o - \bar{R}_o)^2}$$

式中: R_o 为实际观察得到的土壤流失量; R_c 为模型计算得到的土壤流失量, \bar{R}_o 为实测土壤流失量的平均值。如果模型确定性系数为 1, 表示模型计算结果与实测值非常接近; 模型确定性系数为 0, 表示计算值与实测值之差的平方和刚好等于实测值与其平均值的平方和, 这表明可以用实测值的平均值来进行预报, 其预报效果与模型预报的效果一样; 模型确定性系数为负, 则表示实测值的平均值比模型预报值能更好地进行土壤流失量的估计。

通过计算得到各个小区各因子见表 5 和表 6。因为坡面小区不存在谷坊坝与梯田措施, 故将水土保持工程因子 B 统一定为 1。最终计算得到承德市五道沟和南山径流小区的模型确定性系数为 0.890 和 0.859。证明土壤流失方程本身及其参数的取值有一定的合理性说明模拟的结果与真实值非常接近, 能够反映实际侵蚀状况, 可以用于侵蚀模拟。

表5 五道沟径流小区计算值与实测值

Table 5 Calculated value and measured value for Wudaogou runoff plots

小区原始编号	R 因子 ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) $\text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	K 因子 ($\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)	LS 因子	BET 因子	计算值 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	实测值 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
林1	198.638	0.172	6.473	0.049	10.761	8.003
林2	198.638	0.172	7.034	0.055	13.282	9.943
林3	198.638	0.237	7.406	0.138	48.116	23.043
林4	198.638	0.172	12.963	0.055	24.477	8.817
林5	198.638	0.237	6.574	0.138	42.708	39.847
林6	198.638	0.172	11.535	0.055	21.781	16.403
林7	198.638	0.172	8.878	0.018	5.587	7.073
林9	198.638	0.237	7.003	0.138	45.497	84.413
耕1	198.638	0.237	9.193	0.438	189.528	240.400
耕3	198.638	0.237	2.378	0.295	33.044	37.700
耕4	198.638	0.237	3.253	0.324	49.565	48.700
耕5	198.638	0.237	4.380	0.357	73.618	84.300
耕6	198.638	0.237	4.315	0.357	72.518	64.700
耕7	198.638	0.237	4.107	0.357	69.031	80.600

表6 南山径流小区计算值与实测值

Table 6 Calculated value and measured value for Nanshan runoff plots

小区原始编号	R 因子 ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) $\text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	K 因子 ($\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)	LS 因子	BET 因子	计算值 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	实测值 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
1-3	153.260	0.237	6.625	0.018	4.428	5.160
1-4	153.260	0.237	7.168	0.018	4.791	4.250
1-5	153.260	0.237	7.614	0.018	5.089	2.880
1-7	153.260	0.237	6.726	0.040	9.665	10.700
1-9	153.260	0.237	5.576	0.122	24.606	19.130
1-10	153.260	0.237	5.712	0.122	25.210	22.290
1-11	153.260	0.237	5.647	0.122	24.920	20.810
1-13	153.260	0.237	5.921	0.194	41.812	34.540
1-15	153.260	0.237	4.252	0.180	27.803	35.870
1-16	153.260	0.237	4.305	0.068	10.555	6.100
1-17	153.260	0.237	3.750	0.068	9.194	7.690

5 结果与分析

5.1 小流域土壤侵蚀强度与分级

在 ArcGIS 9.3 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》(SL 190-2007)将土壤侵蚀空间图分类分级,获得土壤侵蚀强度分级空间分布图(图4),通过统计分析得出东北沟小流域多年土壤侵蚀强度为 $2359.24 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,属于轻度侵蚀。从表7可以看出,东北沟轻度侵蚀面积占得最大,占到44.1%,其产生的侵蚀量为侵蚀总量的16.2%;而强度及强度以上的面积仅占16.1%,其产生的侵蚀量却占侵蚀总量的66.6%。表明小流域土壤侵蚀空间分布不均匀,侵蚀空间分

异特性显著;同时小流域局部区域土壤侵蚀量大,是侵蚀主要来源。因此本小流域在进行水土保持治理的过程中,其治理的思路应该是不宜成片大面积治理,而是针对水土流失严重的局部区域进行强化治理。

表7 东北沟土壤侵蚀强度分级及相应面积

Table 7 Soil erosion grades and its areas in Dongbeigou watershed

级别	平均侵蚀模数 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	面积 (km^2)	占总面积 百分比	侵蚀量 (t)	占侵蚀总量 百分比
微度	0~200	5.640	29.1	481.732	1.1
轻度	200~2500	8.561	44.1	7414.431	16.2
中度	2500~5000	2.068	10.7	7402.917	16.2
强度	5000~8000	1.538	7.9	9708.579	21.2
极强度	8000~15000	1.209	6.2	12831.204	28.0
剧烈	>15000	0.381	2.0	7920.957	17.3

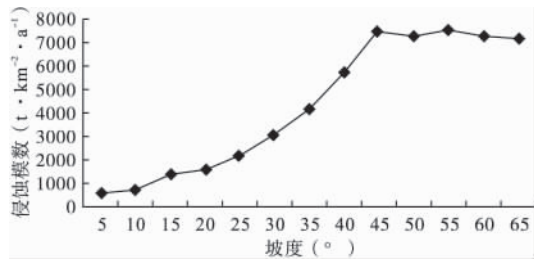


图5 侵蚀模数与坡度的关系
Fig.5 Relationship between soil erosion modulus and slope

5.2 小流域土壤侵蚀规律

5.2.1 土壤侵蚀强度与坡度关系 小流域坡度范围为0~64.9°, 通过 ArcGIS 9.3 中的栅格重分类将坡度每间隔5°分一级, 共13级, 然后利用 ArcGIS 9.3 的区域统计工具, 统计得到每级的平均土壤侵蚀模数。研究发现, 土壤侵蚀模数刚开始随着坡度的增加而迅速增加, 当坡度达到45°左右时, 土壤侵蚀模数有略微缓慢下降的趋势。这说明在一定的条件下坡面土壤侵蚀量随着坡度的增大而增加, 但并非呈绝对的正相关, 当坡度达到一定值时, 侵蚀量反而随着坡度的增大而减少, 这也证明了该区域土壤侵蚀的过程中临界坡度值的存在, 但是其具体值还有待进一步的研究。该规律的发现也从侧面反映利用 CSLE 土壤侵蚀模型进行土壤侵蚀模拟是可行的。

依据水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-2007) 将坡度分级, 得到坡度分级图, 并将其与侵蚀强度图叠加分析, 得到不同坡度的土地的侵蚀量和侵蚀强度(表8)。通过分析可以发现, 流域坡度范围主要集中在15°以上, 其面积占流域的81.2%, 也是侵蚀的主要来源, 占到总侵蚀量的92.1%, 这也是京津水源区土壤侵蚀的主要特征, 因为在该区域地貌类型主要为土石山地, 坡度较大, 土壤侵蚀大部分来自坡度较大, 地表分化裸露严重的坡面。

表8 不同坡度的土壤侵蚀
Table 8 Soil erosion on different slopes

坡度分级 (°)	平均侵蚀模数 (t · km ⁻² · a ⁻¹)	面积 (km ²)	占总面积百分比	侵蚀量 (t)	占侵蚀总量百分比
0-5	511.325	0.628	3.2	321.040	0.7
5-8	612.398	0.743	3.8	455.205	1.0
8-15	1239.840	2.277	11.7	2822.623	6.2
15-25	1887.660	8.819	45.5	16648.170	36.4
25-35	3398.300	6.148	31.7	20894.384	45.7
>35	5919.060	0.780	4.0	4618.447	10.1

5.2.2 土壤侵蚀与土地利用现状的关系 利用 ArcGIS 9.3 的区域统计工具, 统计不同土地利用现状的土壤侵蚀情况, 在此将耕地细分为坡耕地(坡度>8°)与平耕地(坡度<8°), 有林地细分为乔木林、灌木林、经济林地。通过统计可以发现, 不同土地利用其侵蚀模数差异很大, 其大小关系表现为: 坡耕地>荒草地>居民地>平耕地>经济林>灌木林>乔木林>沟道(表9)。东北沟小流域土壤侵蚀最严重的地方是坡耕地, 平均侵蚀模数达6112.9 t · km⁻² · a⁻¹, 其面积仅占5.0%, 侵蚀总量却达到小流域总侵蚀量的13.1%, 同时平耕地面积占流域总面积的2.3%, 这正反应了京津水源区耕地资源现状, 即耕地资源以沟道川坝地、沟台地, 以及大量坡耕地为主。通过对东北沟流域坡耕地资源分析(表10)可得, 坡耕地坡度范围主要集中在8°~25°, 其面积占坡耕地总面积的68.4%, 产生的侵蚀量占到坡耕地总侵蚀量的71.3%, 同时可以看出小流域内仍有在坡度>25°的区域进行种植的现象, 其面积仅为0.065 km², 但是其产生的侵蚀量却到达坡耕地侵蚀总量的22.6%, 侵蚀强度为剧烈侵蚀。因此应该按照国家相关规定, 将坡度>25°的坡耕地进行退耕, 同时加强坡耕地水土保持耕作措施的推广, 做好坡耕地的水土保持工作; 荒草坡是东北沟小流域土地利用现状中最多的一种土地利用, 其占流域面积的33.2%, 但侵蚀量却达74.9%, 通过调查发现, 该类的荒草坡大部分集中在阳坡坡面, 植被盖度较低, 一般在40%以下, 地表裸露风化严重, 是侵蚀的最主要来源, 在小流域治理的过程中宜强化治理; 同时小流域内的有林地植被盖度都较大, 一般都在60%~80%左右, 因而侵蚀相对来说较低; 居民地、平耕地、经济林都是与人类生产生活息息相关, 受人类活动影响较大, 其侵蚀模数明显高于有林地。因此可以得出东北沟小流域治理应该放在坡度较大的坡耕地

表9 不同土地利用现状的土壤侵蚀
Table 9 Soil erosion for different land use types

土地利用现状	平均侵蚀模数 (t · km ⁻² · a ⁻¹)	面积 (km ²)	占总面积百分比	侵蚀量 (t)	占侵蚀总量百分比
坡耕地	6112.900	0.977	5.0	5970.944	13.1
荒草坡	5319.121	6.443	33.2	34272.144	74.9
居民地	977.069	0.208	1.1	203.192	0.4
平耕地	941.336	0.443	2.3	416.728	0.9
经济林	626.265	1.391	7.2	871.088	1.9
灌木林	489.627	7.420	38.3	3633.243	7.9
乔木林	204.295	1.921	9.9	392.431	0.9
沟道	0.082	0.593	3.1	0.048	0.001

表 10 不同坡度坡耕地的土壤侵蚀

Table 10 Soil erosion on slope farmland with different slopes

坡耕地坡度分级 (°)	平均侵蚀模数 ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	面积 (km^2)	占总面积百分比	侵蚀量 (t)	占侵蚀总量百分比
0-5	1374.720	0.084	8.7	116.162	2.0
5-8	1568.940	0.159	16.2	248.943	4.2
8-15	4060.260	0.388	39.7	1575.114	26.4
15-25	9550.960	0.281	28.7	2680.276	44.9
>25	20690.700	0.065	6.7	1350.448	22.6

治理,以及植被盖度条件差的退化的荒草坡上,应该实行大范围内弱化治理,局部区域强化重点治理的原则。

5.2.3 土壤侵蚀与坡向的关系 运用 ArcGIS 9.3 在 DEM 基础之上提取地理坡向,然后依据周启鸣和刘学军(2006)研究将坡向按照通俗划分为阴坡、半阴坡、阳坡、半阳坡、平地以及东西向坡。地理坡向的 8 个坡向所占流域的面积相差不大,但土壤侵蚀空间异质性很明显。通过对比可以发现各个坡向的土壤侵蚀强度大小关系表现为:阳坡>半阳坡>东西向坡>半阴坡>阴坡>平地(表 11)。阳坡、半阳坡、及东向坡的土壤侵蚀为中度侵蚀,其他坡向为轻度侵蚀,而平地则为微度侵蚀。整个流域 59.3% 的侵蚀量都来自于阳坡和半阳坡;而阴坡半阴坡的侵蚀仅占流域侵蚀的 16.2%。

通过对流域调查发现,阳坡面土壤类型主要为褐土、粗骨土,土层都相对较薄,植被类型主要为荒草,以及稀疏灌木,植被覆盖度大多在 30%~50%,水土流失较大。阳坡主要可分为石漠化阳坡,即岩石风化碎屑不严重,坡度大,且植被稀疏,产流大,泥沙量少;其次为砂化阳坡,一般此类阳坡坡度较陡,

表 11 不同坡向的土壤侵蚀

Table 11 Soil erosion for different slope aspects

地理坡向	俗称	平均侵蚀模数 ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	面积 (km^2)	占总面积百分比	侵蚀量 (t)	占侵蚀总量百分比
北	阴坡	954.987	1.694	8.7	1618.149	3.5
东北	半阴坡	1612.390	1.986	10.2	3201.620	7.0
西北		1197.810	2.148	11.1	2573.033	5.6
东	-	2582.703	2.321	11.9	5993.610	13.1
西		1852.530	2.798	14.4	5182.544	11.3
东南	半阳坡	3193.300	2.729	14.1	8715.140	19.1
西南		3162.530	2.752	14.2	8702.640	19.0
南	阳坡	3565.180	2.729	14.1	9728.755	21.3
不存在	平地	185.071	0.240	1.2	44.378	0.1

土层极薄,一般不足 15 cm,且土石混杂,石多土少,岩石出露,严重风化破碎,多粗砂质,植被稀疏,少乔木,灌木呈丛状少片状分布,植株低矮,草本为多年生,呈小片状分布,植被总盖度<40%,水土流失严重,侵蚀形式有浅沟蚀、细沟蚀,产流量、产沙量大,是沟道推移质主要来源;还有面积最广瘠薄的阳坡,此类阳坡土层较薄,一般 50 cm 以下,土地干旱贫瘠,坡度较陡,多在 25°以上。因封山禁牧前过度砍伐和放牧,致使原生植被多被毁坏,次生植被乔木多灌化,以灌草为主,盖度多在 40%左右,土壤侵蚀以面蚀、细沟侵蚀为主,水土流失十分严重。而且因为阳坡光照条件好,有利于作物生长和避免早霜冻,大量坡耕地都分布于阳坡的沟坡上面,坡耕地坡度一般都较陡,土壤侵蚀以面蚀、细沟侵蚀及切沟侵蚀为主,侵蚀强度都在中度及中度以上,是土壤侵蚀的主要来源。半阳坡半阴坡土壤类型主要为褐土、粗骨土,并有少量的棕壤,植被类型主要为灌木林、疏林,其中以水分条件较好的坡面有少量乔木林地,且以油松林最为典型;这 2 种坡面的植被盖度多在 40%~70%,植被条件较好,与阳坡相比水土流失要小得多,侵蚀强度多表现为轻度,部分为中度。阴坡因水分蒸发相对阳坡较少,水分条件较好,便于植被生长,其植被类型以乔木林地为主,植被盖度多在 50%~80%,因而土壤侵蚀强度较低,多表现为轻度以下。因此针对京津水源区的小流域治理,砂化阳坡和瘠薄的阳坡是治理的重点也是治理的难点,其他区域要做好管护工作,严禁滥砍滥伐与随意放牧。

6 结论

基于 GIS 技术和目前国内应用较少的 CSLE 模型对京津水源区东北沟小流域进行土壤侵蚀进行研究。首先用承德市五道沟和南山 2 处共 25 个径流小区的 1983—1985 连续 3 年的降雨侵蚀观测资料进行模型模拟精度的检验,检验结果得到模型确定性系数都在 0.85 以上,说明模型模拟结果精度较高,可以用于该区域土壤侵蚀模拟及定量化研究。通过定量化模拟研究,得出东北沟小流域土壤侵蚀模数为 $2359.24 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,属于轻度侵蚀。

通过模型模拟结果推算发现,当坡度<45°时,土壤侵蚀模数随着坡度的增加而迅速增加,当坡度>45°时,土壤侵蚀模数增加的趋势放缓,并有略微缓慢下降的趋势;同时分析以发现,东北沟小流域坡度范围主要集中在 15°以上,其面积占流域的

81.2% ,是侵蚀的主要来源,占到总侵蚀量的92.1%。

不同土地利用其侵蚀模数空间异质性很大,其大小关系表现为:坡耕地>荒草地>居民地>平耕地>经济林>灌木林>乔木林>沟道。东北沟小流域土壤侵蚀最严重的地方是坡耕地,平均侵蚀模数达 $6112.9 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其面积仅占5.0%,侵蚀总量却达到小流域总侵蚀量的13.1%,坡耕地坡度范围主要集中在 $8^\circ \sim 25^\circ$,其面积占坡耕地总面积的68.4%,产生的侵蚀量占到坡耕地总侵蚀量的71.3%;同时可以看出小流域内仍有在坡度 $>25^\circ$ 的区域进行种植的现象,其面积仅为 0.065 km^2 ,但是其产生的侵蚀量却到达坡耕地侵蚀总量的22.6%,侵蚀强度为剧烈侵蚀;荒草坡是东北沟小流域土地利用现状中最多的一种土地利用,其占流域面积的33.2%,但侵蚀量却达总侵蚀74.9%,是流域土壤侵蚀最主要来源,因此坡耕地和荒草坡是治理的难点和重点所在。

土壤侵蚀在不同坡向上空间异质性也很明显。对比可以发现各个坡向的土壤侵蚀强度大小关系表现为:阳坡>半阳坡>东西向坡>半阴坡>阴坡>平地。整个流域59.3%的侵蚀量都来自于阳坡和半阳坡;而阴坡半阴坡的侵蚀仅占流域侵蚀的16.2%。

参考文献

- 毕小刚,段淑怀,李永贵,等. 2006. 北京山区土壤流失方程探讨. *中国水土保持科学*, 4(4): 6-13.
- 程琳,杨勤科,谢红霞,等. 2009. 基于GIS和CSLE的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究. *水土保持学报*, 23(5): 61-66.
- 黄秉维. 1953. 陕甘黄土区域土壤侵蚀的因素与方式. *地理学报*, (2): 37-41.
- 江忠善,王志强,刘志. 1996. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 2(1): 1-9.
- 刘善建. 1953. 天水水土流失测验的初步分析. *科学通报*, (12): 59.
- 罗红,马友鑫,刘文俊,等. 2010. 采用最大溯源径流路径法估算RUSLE模型中地形因子探讨. *应用生态学报*, 21(5): 1185-1189.
- 王万忠,焦菊英. 1996. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙. 北京: 科学出版社.
- 夏建国,胡萃,刘芸. 2006. 川西低山区土壤侵蚀经济损失及其评估模式——以名山县蒙山为例. *生态学报*, 26(11): 3696-3703.
- 谢红霞,杨勤科,李锐,等. 2010. 延河流域水土保持措施减蚀效应分析. *中国水土保持科学*, 8(4): 13-19.
- 杨娟,葛剑平,李庆斌. 2006. 基于GIS和USLE的卧龙地区小流域土壤侵蚀预报. *清华大学学报(自然科学版)*, 46(9): 1526-1529.
- 张光辉. 2002. 土壤侵蚀模型研究现状与展望. *水利科学进展*, 13(3): 389-396.
- 周启鸣,刘学军. 2006. 数字地形分析. 北京: 科学出版社.
- 朱显谟. 1960. 黄土地区植被因素对水土流失的影响. *土壤学报*, 8(2): 110-121.
- De Roo APJ. 1996. The LISEM project: An introduction. *Hydrological Processes*, 10: 1021-1025.
- Hickey R, Smith A, Jankowski P. 1994. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID. *Computers, Environment and Urban Systems*, 18: 365-380.
- Hickey R. 2000. Slope angle and slope length solutions for GIS. *Cartography*, 29: 1-8.
- Liu BY, Nearing MA, Shi PJ. 2000. Slope length effects on soil loss for steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1759-1763.
- Liu BY, Zhang KL, Xie Y. 2002. An empirical soil loss equation // Liu BY, ed. 12th ISCO Conference. Beijing: Tsinghua Press: 143-149.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
- Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, et al. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE*, 32: 1587-1593.
- Williams JR, Renard KG, Dyke PT. 1983. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38: 381-383.
- Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses // United States Department of Agriculture (USDA). Agricultural Handbook No. 537. Washington DC: USDA.
- Xu X, Miao CY, Liao YF. 2008. Quantitative remote sensing study on regional soil erosion, Bin county of Heilongjiang as an example. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 13: 377-384.

作者简介 江青龙,男,1985年生,硕士研究生,从事GIS在水土保持中应用的相关研究。E-mail: gisfresher@nwsuaf.edu.cn

责任编辑 魏中青