

吉林省水蚀模数与下垫面各因素的关系

张启昌^{1,2}, 其其格¹, 周道玮^{2*}, 岳红光¹

(1. 北华大学林学院, 吉林 132013; 2. 东北师范大学草地研究所, 植被生态科学教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要:利用遥感技术对吉林省水蚀情况进行调查,并运用线性模型理论,研究了水蚀灾害的影响因素,分析了下垫面诸因素对水蚀模数的影响程度,找出影响水蚀模数的主导因素。结果表明:影响吉林省水蚀模数的下垫面各因素中,成土母质、土地利用类型、植被覆盖度 3 个因子与水蚀模数的关系在 0.05 水平上达到显著程度。不同成土母质水蚀模数的大小次序为:石质<土石质<土质<黄土。吉林省土地利用类型中裸地的平均水蚀模数为 6500t/(km²·a),针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌木林、草地、农田的平均水蚀模数依次是 250、1440、2366、3446、1188、2917t/(km²·a),分别比裸地减少 96.2%、77.8%、63.6%、47.0%、81.7%、55.1%。随着植被覆盖度的增大,水蚀模数显著减少。农田覆盖度与植被覆盖度 30%~50%的水土保持功效相当。各因素正规方程解可预测不同立地条件下的水蚀模数,相关系数达到 0.975(自由度为 53)。该研究为吉林省预防及治理水蚀灾害提供了理论依据。

关键词:水蚀模数;遥感技术;土壤侵蚀;水土保持;吉林省
文章编号:1000-0933(2005)08-1960-06 中图分类号:S157.1 文献标识码:A

Researches on the relationship between the water erosion modulus and the earth surface factors in Jilin Province

ZHANG Qi-Chang^{1,2}, QI Qi-Ge¹, ZHOU Dao-Wei^{2*}, YUE Hong-Guang¹ (1. Forestry institute of Beihua University, Jilin, 132013, China; 2. Institute of Grassland Science, Northeast Normal University, Key Laboratory for Vegetation Ecology, Ministry of Education, Changchun 130024, China) . *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1960~1965.

Abstract: Soil erosion and the subsequent land degradation has become one of the most serious environmental problems. To study the relationship between the soil erosion amount and various factors and to set up soil erosion prediction model form the basis of controlling soil erosion and improving environment. Based on the information provided by landsat TM remote sensing technique, combining the remote sensing information with geographic data, synthetic analysis with principal factor analysis, indoor interpretation with field checking, this study investigated the factors that affect water erosion disasters, find the principal factors that affect water erosion modulus with linear model theory. The study provides theoretical basis for preventing and controlling water erosion disasters in Jilin Province.

Information mainly came from the American landsat TM. Relative sources of information included professional maps of the study area such as soil type map, topographic map, land type map, geologic map, geomorphological map, vegetation type map, administrative map, watershed borderline map, hydrometeorological data and other reports concerned. The present writers established the interpretation marks of erosion factors by identifying landscape, hue and graph information, analyzing geographic data. Water erosion is the result of the synthetic effect of varied factors, so the paper chose linear model theory to conduct profound analysis. With parent material, effective soil layer thickness, soil type, landform type, slope gradient, length of slope, land-use type and vegetation coverage being independent variables, each of which served as qualitative factor, the above independent variables were respectively divided into 4, 4, 6, 5, 4, 4, 7, 6 levels. With water erosion modulus being

基金项目:国家重点基础研究(973)发展规划资助项目(G2000018606)
收稿日期:2005-01-04; **修订日期:**2005-06-11
作者简介:张启昌(1964~),男,蒙古族,博士生,教授,主要从事恢复生态与森林培育学研究. E-mail: zqc1212@sina.com
通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhoudw@nenu.edu.cn
Foundation item: Supported by the National Key Basic Research Program (No. G2000018606)
Received date: 2005-01-04; **Accepted date:** 2005-06-11
Biography: ZHANG Qi-Chang, Ph. D. candidate, Professor, mainly engaged in restoration ecology and silviculture. E-mail: zqc1212@sina.com

dependent variable, the present writers, through further calculation, obtained linear model formal equation solutions and the hypothesis test results about the effect of each factor on water erosion amount.

The results showed that among the earth surface factors that affect water erosion modulus in Jilin Province, the relationship between the three factors—parent material, land-use type, and vegetation coverage-and water erosion modulus, came to the remarkable degree at the level of 0.05. The increasing order of water erosion modulus in different parent materials was; rock<rock and clod<clod<loess. Among different land-use types in Jilin Province, the water erosion modulus of bare land was 6500t/(km²·a), compared with which, the water erosion modulus of coniferous forest, broad leaved forest, mixture forest, shrub, grassland and cultivated land, being 250, 1440, 2366, 3446, 1188, 2917t/(km²·a) respectively, decreased by 96.2%, 77.8%, 63.6%, 47.0%, 81.7% and 55.1%. With the increase of vegetation coverage, the water erosion modulus decreased remarkably. The soil and water conservation benefit of cultivated land coverage was equal to that of 30%~50% vegetation coverage. The formal equation solutions of factors could predict water erosion modulus at different sites, multiple correlation coefficient being 0.975.

Key words: water erosion modulus; remote sensing technique; soil erosion; soil and water conservation; Jilin Province

土壤侵蚀及其导致的土地退化,已经成为当今世界最为严重的生态环境问题之一。研究土壤侵蚀量与下垫面各因素的关系并建立土壤侵蚀预报模型,是治理土壤侵蚀及改善生态环境的基础。而遥感技术具有多种类、多平台、多时段、多波段的特色和信息丰富、信息周期短等优势,无疑是快速有效的先进手段之一^[1]。国外许多国家已将遥感技术广泛应用于土壤侵蚀调查,并开发出基于物理过程的土壤侵蚀预报模型^[2~10]。我国在土壤侵蚀地面观测、遥感监测方面已取得许多成果^[11~16],但在区域土壤侵蚀评价、预报模型开发和影响因素的定量分析方面,缺少系列化观测与统计数据,已有的坡面土壤侵蚀模型等在通用性、适用性方面还存在不少问题^[17]。本文借助遥感技术获得吉林省土壤水蚀图斑资料,找出下垫面各因素对土壤水蚀模数的影响程度,为该地区制定土壤侵蚀监测系统与水土保持治理规划提供科学依据。

1 研究地区自然概况

吉林省地处东经 121°38′~131°19′,北纬 40°52′~46°18′。地貌主要由长白山山地和松辽平原构成。气候属温带大陆性季风气候,春季多风、干旱,夏季温热,降雨集中;雨热同季,秋季降温快、早霜,冬季漫长、寒冷、干燥。年平均气温 2~6℃,最低气温出现在 1 月份,最低可达-39.4℃。年平均降水量为 500~600mm,降水分布由东南向西北递减,东部长白山山区降水较多,约 700~800mm,中部台地平原区年降水量为 500~600mm,西部平原区年平均降水量为 400~500mm。降雨量多集中在 7、8、9 三个月份,降雨量占全年 60%以上。本省河流众多,河长 30km 以上的河流有 221 条,全省多年平均河川径流为 356 亿 m³,植被由东至西,随生物气候条件的更替,依次形成森林植被群落、森林草原植被群落和草原植被群落,森林资源丰富,森林覆盖率达 35.9%。山体主要由花岗岩、玄武岩、沉积岩、冲积淤积物、变质岩等组成。土壤类型主要有白浆土、草甸土、暗棕壤、砂土、灰化土、黑土、黑钙土等。该省现有水土流失面积 39881.8km²,占全省土地面积的 20.88%。其中,水蚀面积 24097.3km²,占全省水土流失面积的 60.42%。

2 研究方法

选取美国陆地资源卫星 TM 波段假彩色合成影像为主要信息源。同时以研究区土壤类型图、地形图、土地利用现状图、地质图、地貌图、植被图、行政区划图和流域界线图等专业性图件;站点的水文、气象资料(包括水文站点的水文泥沙资料、实验站的土壤侵蚀观测资料、淤地坝的泥沙淤积资料)及其它有关研究报告为相关信息源。通过景观、色调和图形信息的识别,加上地学资料的分析,建立各种侵蚀因素的解译标志。根据卫片解译的基本原理,从 TM 影像的色调、形状、大小、位置、结构、阴影、图形和其它相关体进行判读分析,进行土壤侵蚀解译。根据解译过程中所出现的问题以及实际工作的需要,将室内解译的资料进行野外验证。利用小型水库、塘坝的多年淤积量,再结合小型野外降雨设备来推算侵蚀模数,并与影像建立关系(即建立解译标志),来确定相应图斑的侵蚀强度级别。

水蚀是各种因素综合影响的结果,从调查资料中不能直观看出各因素对水蚀量的影响程度,因此,选择线性模型理论做较深入的分析^[18,19]。根据所研究地区的自然情况及图斑资料,将自变量确定为:①成土母质;②有效土层厚度;③土壤类型;④地貌类型;⑤坡度;⑥坡长;⑦土地利用类型;⑧植被覆盖度。根据吉林省的实际,将各自变量作为定性因子更为合适,以上自变量依次划分为 4,4,6,5,4,4,7,6 个水平(类目)(表 1),将水蚀模数作为因变量(Y),Y 由各图斑水蚀模数区间中值组成,把各自变量数量化,可得数量化方法设计的矩阵 X 及 Y(表 1)。设基础效应为 b₀,X_i 对 Y 的效应力为 b_i(i=1,2,⋯,40),且定性因子最后一个类目的效应力为 0,即 i=4,8,14,19,23,27,34,40。设计效应向量 β 为:β=[b₀, b₁, b₂⋯, b₃₈, b₃₉],表 1 中再删去非独立参数所在的列,将设计矩阵约化为即约矩阵 X, X=[x₁, x₂, ⋯, x₁₉, x₂₀, ⋯, x₃₈, x₃₉],可得因变量矩阵 Y 的一元线性模型:

表 1 各因子类目划分及数量化方法设计的矩阵 X 及 Y

Table 1 Matrix X & Y of quantitative method design and category classification for every factor

图斑号(1)	基准水平(2)	成土母质 Parent material				有效土层厚度(cm) Effective soil layer thickness				土壤类型 Soil type						地貌类型 Landform type				
		石质 x_1 (3)	土石质 x_2 (4)	土质 x_3 (5)	黄土 x_4 (6)	x_5 <35 (7)	x_6 35~44	x_7 45~60	x_8 >60 (8)	灰棕壤 棕壤 x_9 (9)	白浆土 x_{10} (10)	草甸土 x_{11} (11)	砂土 x_{12} (12)	灰化土 x_{13} (13)	栗钙土 黑土 黑土钙 x_{14} (14)	平原 x_{15} (15)	台地 x_{16} (16)	丘陵 x_{17} (17)	低山 x_{18} (18)	中山 x_{19} (19)
1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
40	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
41	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
85	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0

图斑基准号	水平	坡度(°) Slope gradient				坡长(m) Length of slope				土地利用类型 Land-use type						植被覆盖率(%) Vegetation coverage					因变量 Dependent variable		
		x_{20} <3° (20)	x_{21} 3~8°	x_{22} 9°~15°	x_{23} >15° (21)	x_{24} 0~999	x_{25} 1000 ~ 1299	x_{26} 1300 ~ 6000	x_{27} > 6000	针叶林 x_{28} (23)	阔叶林 x_{29} (24)	混交林 x_{30} (25)	灌木林 x_{31} (26)	裸地 x_{32} (28)	草地 x_{33} (28)	农田 x_{34} (29)	x_{35} 10~30	x_{36} 31~50	x_{37} 51~70	x_{38} 71~90	x_{39} >90 (30)	农田 x_{40} (31)	水蚀模数 y_1 (32)
1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2500
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
40	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1500
41	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1500
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
85	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	6500

(1) Map delineation number; (2) Standard level; (3) Rock; (4) Rock and clod; (5) Clod; (6) Loess (7) <35; (8) >60; (9) Gray forest soil and Burozem; (10) Baijiang soil; (11) Meadow soil; (12) Sandy soil; (13) Podzolic soil; (14) Chetunt soil, Black soil and Chernozem; (15) Plain; (16) Tableland; (17) Hill; (18) Low mountain; (19) Middling mountain; (20) <3°; (21) >15°; (22) >6000; (23) Coniferous forest; (24) Broad leaved forest; (25) Mixture forest; (26) Shrub; (27) Bare land; (28) Grassland; (29) Cultivated land; (30) >90; (31) Cultivated land; (32) Water erosion modulus

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

(1)

$$85 \times 1 \qquad 85 \times 40$$
$$E(Y) = X\beta, D(Y) = \sigma^2 I$$

(2)

式中, X 为线性模型的设计矩阵; β 为待估参数; ε 为随机误差。

再经过进一步计算,就可得到线性模型正规方程解及各因子对水蚀量影响效应的假设检验结果。

3 结果与分析

计算过程在计算机上完成,经计算可得吉林省各主因子对水蚀模数影响效应假设检验表(表 2)。从表 2 可以看出,成土母质、土地利用类型和植被覆盖度 3 个因子的 F 值依次是 24.93、10.38 和 92.96,大于相应的 $F(0.05)$ 值,说明这 3 个因素对水蚀模数有显著影响。土壤类型的 F 值为 1.81,接近相应的 $F(0.05)$ 值,说明土壤因素对水蚀的发生、发展也有着重要影响。坡度因子的 F 值较小,只有 0.62,说明在大尺度范围内,该地区的坡度因子与水蚀量的关系并不密切,这主要是由于吉林省陡坡相对较少,且坡度较大的中山、低山地区多为森林覆盖,抵消了由于坡度增大而使水蚀量加大的趋势,另外在低缓的丘陵斜坡多开垦为耕地,土壤侵蚀严重。

表 2 主因子对水蚀模数影响效应假设检验表

Table 2 Hypothesis test of every factor to water erosion modulus					
误差来源 Error source	离差平方和 Square sum of deviation	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F (值) F -value	$F(0.05)$
成土母质(1)	29952990.00	3	9984330.00	24.93	2.78
有效土层厚度(2)	651694.30	3	217231.40	0.54	2.78
土壤类型(3)	3616314.00	5	723262.70	1.81	2.39
地貌类型(4)	339774.80	4	84943.69	0.21	2.55
坡度(5)	742072.50	3	247357.50	0.62	2.78
坡长(6)	985135.90	3	328378.60	0.82	2.78
土壤利用类型(7)	24942380.00	6	4157063.00	10.38	2.28
植被覆盖度(%) (8)	185619600.00	5	37123920.00	92.69	2.39
剩余误差(9)	20827200.00	52	400523.10		

(1)Soil forming rock;(2)Effective soil layer thickness;(3)Soil type;(4) Landform type;(5)Slope gradient;(6)Length of slope;(7)Land-use type;(8)Vegetation coverage(%);(9)Surplus error

下面结合几个主导因子各水平得分值及水蚀模数的平均值,分析其主导因子与水蚀模数的关系,并对水蚀预测进行说明。

(1)成土母质与水蚀模数的关系 岩石是矿物的集合体,由于成因不同,有岩浆岩、沉积岩和变质岩 3 种。陆地上的岩石通过风化作用形成风化物,风化物再经重力、水和风的搬运,重新堆积成为不同形态和性质的成土母质。岩石是形成土壤的基础,岩石的矿物组成和化学成分都在一定程度上影响土壤的形成和土壤的性质。在陆地卫星多光谱扫描像片、假彩色合成像片和航空摄像片等遥感图像资料上,识别各类岩石的解译标志主要是色和形,不同的岩石具有不同的光谱反射规律,这就成为成土母质解释的理论基础。选择其他下垫面条件都相似的图斑,统计不同成土母质的水蚀模数,绘制成成土母质对水蚀模数大小的影响图(见图 1),从图 1 可知石质母质的平均水蚀模数最小,为 1500t/(km² · a),其次是土石质母质,其平均水蚀模数为 2094t/(km² · a),再次是土质母质,其平均水蚀模数为 2484t/(km² · a),最后是黄土,其平均水蚀模数为 4250t/(km² · a)。这说明就成土母质各水平因子而言,以石质防止水蚀的作用最好,其次是土石质,土质较差,而黄土受侵蚀最严重。这主要是因为石质和土石质母质粒度较大且坚实;洗刷作用的强度与碎屑的颗粒成反比;黄土质地均一,具有多孔性,垂直节理,无层理,遇水崩解后容易松散。在吉林省境内花岗岩、片麻岩较多,在干燥气候条件下易物理风化,而遭受水蚀侵害。

(2)土地利用类型与水蚀模数的关系 土地利用类型的 F 值为 10.38,在 0.05 水平上达到显著水平,对水蚀模数的影响较大。选择其他下垫面条件都相似的图斑,统计不同土地利用类型的水蚀模数,绘制成土地利用类型对水蚀模数大小的影响图(见图 2),从图 2 可以看到:裸地的水蚀模数为 6500t/(km² · a),针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌木林、草地、农田的平均水蚀模数

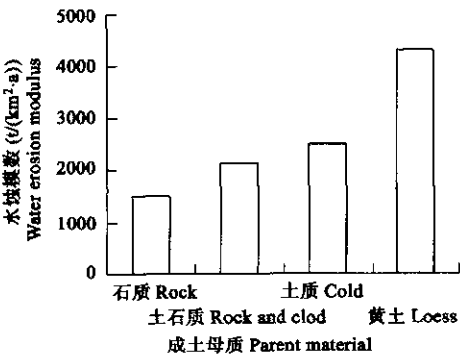


图 1 成土母质对水蚀模数大小的影响

Fig.1 Effect of parent material on water erosion modulus

石质 Rock;土石质 Rock and clod;土质 Clod;黄土 Loess

在吉林省境内花岗岩、片麻岩较多,在干燥气候条件下易物理风化,而遭受水蚀侵害。

(2)土地利用类型与水蚀模数的关系 土地利用类型的 F 值为 10.38,在 0.05 水平上达到显著水平,对水蚀模数的影响较大。选择其他下垫面条件都相似的图斑,统计不同土地利用类型的水蚀模数,绘制成土地利用类型对水蚀模数大小的影响图(见图 2),从图 2 可以看到:裸地的水蚀模数为 6500t/(km² · a),针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌木林、草地、农田的平均水蚀模数

依次是 250、1440、2366、3446、1188、2917t/(km²·a),分别比裸地减少 96.2%、77.8%、63.6%、47.0%、81.7%、55.1%。说明林地、草地、农田都较裸地小,林草水土保持的功效益显著。这主要是由于植被可对降雨阻留,保持地表不直接受雨滴打击;可调节地表径流,增加土壤渗透时间;可改进土壤的团粒构造及孔隙率,增进土壤抗蚀性和抗冲性能。

(3)植被覆盖度与水蚀模数的关系 植被覆盖度的 *F* 值最大,为 92.69(表 2)。说明影响水蚀模数的下垫面各因素中,植被覆盖度的作用最大。选择其他下垫面条件都相似的图斑,统计不同植被覆盖度的水蚀模数,绘制成植被覆盖度对水蚀模数大小的影响图(见图 3),从图 3 可知,植被覆盖 10%~30%、31%~50%、51%~70%、71%~90%、>90%和农田覆盖度的年平均水蚀模数依次为 6045、3750、1368、250、250 和 2916t/(km²·a),随着植被覆盖度的增大,水蚀模数显著减少。因此,在土壤侵蚀治理过程中,采取植树种草,增加植被覆盖度是一项非常重要的措施。农田的覆盖度随季节而变化,无法用数值表示,而从图 3 可知,农田覆盖度与植被覆盖度 30%~50%的水土保持功效相当。

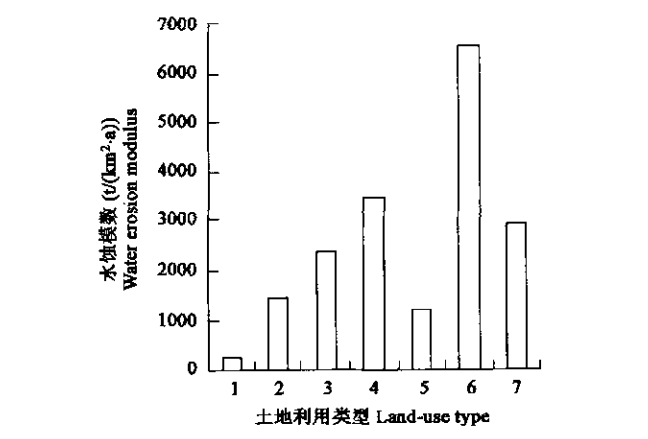


图2 土地利用类型对水蚀模数大小的影响

Fig.2 Effect of land-use type on water erosion modulus

1. 针叶林 Coniferous forest;2. 阔叶林 Broad leaved forest;3. 混交林 Mixture forest;4. 灌木林 Shrub;5. 草地 Grassland;6. 裸地 Bare land;7. 农田 Cultivated land

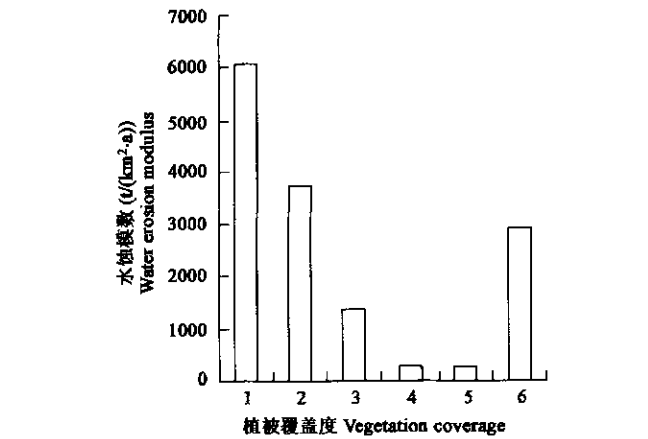


图3 植被覆盖对水蚀模数大小的影响

Fig.3 Effect of vegetation coverage on water erosion modulus

1. 10%~30%;2. 31%~50%;3. 51%~70%;4. 71%~90%;5. >90%;6. 农田 Cultivated land

(4)水蚀量预测 表 3 是各因子水蚀模数正规方程解(得分),其复相关系数达到 0.975(自由度为 53)。运用表 3 中的数值,可用公式 $Y = \sum b_i x_i$ 预测在某种立地条件下指标水蚀模数的大小。基础效应为 b_i, x_i 对 Y 的效应力为 $b_i (i=1, 2, \dots, 40)$ 。 x_i 是某类目(水平)的反应值,反应为 1,不反应为 0。

表 3 各因子对水蚀模数正规方程解(得分)表											
Table 3 Formal equation solution of every factor to water erosion modulus											
<i>i</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>bi</i>	30275.1	−35782.4	−25191.2	1408.5	0.0	330.2	254.6	59.0	0.0	1046.5	1615.2
<i>i</i>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<i>bi</i>	74192.9	78928.7	1322.5	0.0	−105610.6	−26987.4	−26650.5	−215.4	0.0	−403.0	−305.6
<i>i</i>	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
<i>bi</i>	95.3	0.0	89.2	−203.6	−191.7	0.0	7101.1	7082.2	7220.7	12797.7	
<i>i</i>	33	34	35	36	37	38	39	40			
<i>bi</i>	7226.7	0.0	−6956.1	−9488.8	−11872.7	−12928.0	−13195.9	0.0			

4 结论

(1)影响吉林省水蚀模数的下垫面各因素中,成土母质、土地利用类型、植被覆盖度 3 个因子对水蚀模数的影响在 0.05 水平上达到显著程度。植被覆盖度的 *F* 值最大,与水蚀量的关系最密切。

(2)成土母质是影响水蚀的主导因子之一,并随着母岩的形成、结构及性质上的不同而发生变化,成土母质的水蚀量以石质最小,其次是土石质和土质,黄土遭受水蚀最为严重。

(3)吉林省土地利用类型中裸地的水蚀模数为 6500t/(km²·a),针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌木林、草地和农田的平均水蚀模数依次是 250、1440、2366、3446、1188t/(km²·a)和 2917 t/(km²·a),分别比裸地减少 96.2%、77.8%、63.6%、47.0%、

81.7%和55.1%。

(4)从植被覆盖度10%~30%、31%~50%、51%~70%、71%~90%、大于90%和农田的年平均水蚀量依次为6045、3750、1368、250、250、2916 t/(km²·a),随着植被覆盖度的增大,水蚀模数显著减少。农田覆盖度与植被覆盖度30~50%的水土保持功效相当。

(5)通过各主因子水蚀模数正规方程解(得分),可预测在某种立地条件下指标水蚀模数的大小。其相关系数达到0.975(自由度为53)。

References:

[1] Xue L H, Yang L Z. Research Progress on Remote Sensing of Soil Erosion in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, **18** (3): 187~189.

[2] Jurgens C, Fander M. Soil erosion assessments by means of Landsat TM and ancillary digital data in relation to water quality. *Soil Technol.*, 1993, (6): 215~223.

[3] Rembold F, Carnicelli S, Nori M, *et al.* Use of aerial photographs, landsat TM imagery and multidisciplinary field survey for land-cover change analysis in the lakes region (Ethiopia). *JAG*, 2000, **2**(3): 181~189.

[4] Quirk B K, Scarpace F L. A comparison between aerial photohraphy and Landsat for computer land-cover mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1982, **48**(2): 235~240.

[5] Lyon J G, Yuan D, Lunetta R S, *et al.* A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, **64**: 143~150.

[6] Graef F, Duivenbooden N, Stahr K. Remote sensing and transect-based retrieval of special soil and terrain (SOTER) information in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments*, 1998, **39**: 631~644.

[7] Khawlie M, Awad M, Shaban A, *et al.* Remote sensing for environmental protection of the eastern Mediterranean rugged mountainous areas, Lebanon. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2002, **57**: 13~23.

[8] Richter R. A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11** (1): 159~166.

[9] Rosenfield G, Fitzpatrick-Lins K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, **52**(2): 223~227.

[10] Kwarteng A Y, Chavez P S. Change detection study of Kuwait City and environs using multi-temporal landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**: 1651~1662.

[11] Qiao Y L, Qiao Y. Fast soil erosion investigation and dynamic analysis in the loess plateau of China by using information composite technique. *Advance in Space Research*, 2002, **29**(1): 85~88.

[12] Tian G J, Zhang Z X, Zhao X L, *et al.* The Soil Erosion Distribution Characteristics and Ecological Background of Chinese Cultivated Land. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(1): 10~22.

[13] Zou Y Y, Zhang Z X, Yang C J, *et al.* Analysis of Soil Erosion Status of China Land Resource. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(3): 44~47.

[14] Shi D M, Shi X R, Li D C, *et al.* Study on Dynamic Monitoring of Soil Erosion Using Remote Sensing Technique. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, **33**(1): 48~58.

[15] Zhao X L, Zhang Z X, Zhou Q B, *et al.* Spatial Relationship of Soil Erosion and Its Geographical Environment Background in China. *Journal of Mountain Science*, 2002, **20**(3): 277~283.

[16] Ma A Q, Wang Y M, Chen D J, *et al.* Estimate Status and Potential Degree of Desertification in Gan Su Province Based on RS and GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(6): 1~8.

[17] Li R, Yang J K, Zhao Y A. Present Situation and Issues of the Study of Dynamic Monitoring and Evaluation of Soil and Water Loss. *Soil and Water Conservation in China*, 1999, (11): 31~33.

[18] Zhang Q C, Meng Q F, Lan X L. Study on Damp-surface Motion in Loess Low Hill Area. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1996, **2**(4): 84~88.

[19] Lang K J, Li F R, Li C S, *et al.* *Application of Microcomputer in Forestry*. Harbin: Publishing House of Harbin Engineering University, 1995. 265~291.

参考文献:

[1] 薛利红, 杨林章. 遥感技术在我国土壤侵蚀中的研究进展. *水土保持学报*, 2004, **18**(3): 187~189.

[2] 田光进, 张增祥, 赵晓丽, 等. 中国耕地土壤侵蚀空间分布特征及生态背景. *生态学报*, 2002, **22**(1): 10~22.

[3] 邹亚荣, 张增祥, 杨存建, 等. 中国土地资源的土壤侵蚀状况分析. *水土保持学报*, 2001, **15**(3): 44~47.

[4] 史德明, 石晓日, 李德成, 等. 应用遥感技术监测土壤侵蚀动态的研究. *土壤学报*, 1996, **33**(1): 48~58.

[5] 赵晓丽, 张增祥, 周全斌, 等. 中国土壤侵蚀与其地理环境背景的空间关系. *山地学报*, 2002, **20**(3): 277~283.

[6] 马安青, 王一谋, 陈东景, 等. 基于RS和GIS的甘肃省沙漠化现状及潜在沙漠化程度评价. *水土保持学报*, 2003, **17**(6): 1~8.

[7] 李锐, 杨勤科, 赵永安. 水土流失动态监测与评价研究现状与问题. *中国水土保持*, 1999, (11): 31~33.

[8] 张启昌, 孟庆繁, 兰晓龙. 黄土低山丘陵区湿润锋运动的实验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, **2**(4): 84~88.

[9] 郎奎健, 李凤日, 李长胜, 等. *微机在林业上的应用*. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995. 265~291.