

基于 RUSLE 的大通县土壤侵蚀量估算

贾俊姝¹, 陈金莲², 高欣³, 万书勤¹, 高国雄^{4*}

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 内蒙古自治区鄂尔多斯市东胜区水土保持工作站, 内蒙古 东胜 017000; 3. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 4 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘要:大通县地处青藏高原与黄土高原过渡地带, 生态区位十分重要。利用 1995 年和 2005 年 2 期 TM 遥感影像, 基于 RUSLE 土壤侵蚀预报模型和 GIS 技术, 估算出大通县 2 个时期土壤侵蚀的定量数据, 阐明了大通县土壤侵蚀变化状况。1995 年土壤侵蚀总量为 $2\,938.17 \times 10^4 \text{ t}$, 侵蚀模数为 $68.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 2005 年土壤侵蚀总量为 $2\,160.07 \times 10^4 \text{ t}$, 侵蚀模数为 $51.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 从 1995 年到 2005 年大通县土壤侵蚀状况有所减轻。

关键词:大通县; 遥感; GIS; 土壤侵蚀; RUSLE

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2012)02-0056-06

Estimation of Soil Erosion Based on RUSLE in Datong County

JIA Jun-shu¹, CHEN Jin-lian², GAO Xin³, WAN Shu-qin¹, GAO Guo-xiong^{4*}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Soil and Water Conservation Station of Dongsheng District of Erdos City, Inner Mongolia Autonomous Region, Dongsheng, Inner Mongolia 014010, China; 3. Xian Scientific and Technical University, Xian, Shaanxi 710054, China; 4. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Datong is located in the transition zone of Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau, a very important ecological area. Based on soil erosion prediction model(RUSLE) and GIS technology with the application of remote sensing in 1995 and 2005, the quantitative soil erosion and the transformation status of Datong county were esimated. The actual quantity of soil-erosion and the soil erosion modulus were $2\,938.17 \times 10^4 \text{ t}$, $68.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $2\,160.07 \times 10^4 \text{ t}$, $51.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively in 1995 and 2005, indicating that soil-erosion status was improving gradually with the reduction of soil-erosion quantity from 1995 to 2005.

Key words: Datong county; remote sensing; GIS; soil erosion; RUSLE

在全球气候变化影响下, 青藏高原的生态环境面临严重的问题, 特别是青东湟水、黄河谷地地区为黄土分布西缘区, 地表为黄土覆盖, 因而土壤疏松, 抗蚀能力弱, 另外, 此区是青海人口密集的地区, 强烈的人为活动对土壤侵蚀起到了重要作用^[1-2]。但是长期以来由于其高海拔、自然条件严酷, 难以利用常规调查手段开展科学研究工作, 有关青藏高原高寒地区土壤侵蚀方面的研究还比较缺乏, 尤其是土

壤侵蚀导致土地退化及土壤侵蚀变化与环境背景之间的联系研究很少。本研究选择青海省大通县为研究区域, 在 RS、GIS 技术的支持下, 基于土壤流失通用方程 RUSLE 为研究区进行了土壤侵蚀定量调查和监测、土壤侵蚀变化情况进行了分析研究, 为大通县控制土壤流失、高效利用有限的土地资源提供基础资料和科学依据。

收稿日期: 2011-01-16 修回日期: 2011-06-06

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAC55B07-01); 宁夏农业综合开发土地治理科技推广项目(NTKJ-11-02)。

作者简介: 贾俊姝, 女, 博士后, 主要研究方向: 水土保持。E-mail: lizixiao200691@163.com

* 通讯作者: 高国雄, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 水土保持与荒漠化防治。E-mail: ggx2000@126.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大通县地处青藏高原和黄土高原的过渡地带,以流水地貌和黄土梁峁为主^[3],介于 100°51′~101°56′E、36°43′~37°23′N 之间,总面积 3 090 km²,海拔 2 280~4 622 m,多年平均降水量 508 mm,年平均蒸发总量为 1 290 mm,月平均风速为 2 m·s⁻¹,土壤类型较多,垂直分布比较明显。北川河为境内主要河流,多年平均流量 20.9 m³·s⁻¹。县内水土流失严重,流失面积达 1 978 km²,占总面积的 64%。因海拔、气候、植被、土壤和农业生产特点的不同,全境分为河谷阶地(川水)、高原丘陵地(浅山)、中山(脑山)和高山 4 个地区。

1.2 数据及处理

采用的数据主要包括:大通县 1995 年和 2005 年 2 期遥感影像、1:50 000 地形图、行政边界图、12 个站点的气象资料、土壤调查资料、水文资料等。采用的遥感信息源为美国的陆地卫星 Landsat5-TM 影像,来源于中国遥感卫星地面站,获取时间分别为 1995-06-11 和 2005-06-06,地面分辨率 30 m×30 m,为了更好的突出地表的植被信息,进行了 4、3、2 波段的假彩色合成。

数字图像处理使用的软件:Erda Image 9.1 用于遥感图像的预处理及分类等;R2V32 用于图像的数字矢量化;ArcMap 9.0 用于数据的空间分析及地图的代数运算等。

1.3 研究方法

RUSLE 模型是为评价长期年平均侵蚀量而设计的,由于其充分综合了不同地理、气候条件下的实测资料,而且可以直接利用遥感数据,因此具有较好的适宜性,是目前使用范围最广的土壤侵蚀预报模型。建立土壤流失方程的主要目的是指导人们在土壤保持规划中做出科学决策^[4]。

RUSLE 的数学表达式为:

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

(1)

式中:A—单位面积上时间和空间平均的土壤流失量(t·hm⁻²·a⁻¹);R—降雨侵蚀力因子(MJ·mm·hm⁻²·h⁻¹·a⁻¹);K—土壤可蚀性因子(t·hm²·h·hm⁻²·MJ·mm⁻¹);L、S—地形因子,由坡长

因子和坡度因子组成,无量纲;C—覆盖管理因子,无量纲;P—水土保持措施因子,无量纲。

2 RUSLE 各因子值的估算

2.1 降雨侵蚀力因子 R

根据收集的降雨资料以及研究区降水强度不大的特点,分析研究国内外 R 值的计算方法,拟采用 Arnolaus 的估算公式来计算大通县降雨侵蚀力因子 R 值,该公式是应用美国 164 个站和西非 14 个站的资料,采用 F. Fournier1980 提出的 R 值计算公式的结构形式建立的^[5]。

$$R=0.0302\left(\sum_{i=1}^{12}\frac{p_i^2}{p}\right)^{1.93}$$

(2)

式中:R—降雨侵蚀力(美制单位);p_i—月降雨量和 p—年降雨量(mm)。为了将 R 值的单位统一成国际制单位(MJ·mm·hm⁻²·h⁻¹·a⁻¹),公式(2)需乘以系数 17.02 进行单位转换。

土壤冻融与融雪作用修正:根据大通县地处高海拔,冰冻期较长的独特地理环境,针对土壤冻融和融雪作用修正降雨侵蚀力值,使用全年降雨侵蚀力类比值,其简易公式为^[4]:

$$R_{eq}=-2\,195.6+8.45p$$

(3)

式中 R_{eq}—降雨侵蚀力类比值(MJ·mm·hm⁻²·h⁻¹·a⁻¹);p—年降雨量(mm)。大通县高山区海拔为 3 200~3 800 m,本研究拟 3 500 m 以上地区采用公式(3)计算其降雨侵蚀力类比值 R_{eq}。

根据收集到的大通县雨量资料分析,利用研究区孔家梁、碛门、黑林、衙门庄、景阳、陈家庄、牛场、十道班、九道班、大通、他哇、桥头刘站 12 个站点 1991—1999 年逐月降雨资料,计算得到各站点多年平均降雨侵蚀力 R 值,然后使用反距离权重插值函数(inverse distance weighted)对各气象站多年平均降雨侵蚀力进行空间分布分析,求算出每个栅格单元的降雨侵蚀力 R 值,得到大通县降雨侵蚀力空间分布(图 1)。

2.2 土壤可蚀性因子 K

根据土壤剖面的机械组成、粒径含量、有机质含量等实地调查采样数据,参考刘吉峰^[6]等的研究成果,结合研究区土壤垂直分布明显的特点,确定大通县 5 种主要土类的 K 值(表 1)。

表 1 大通县土壤可蚀性因子 K 值

Table 1 Soil erodibility K values of Datong County

土壤类型	高山石质土	草甸土	山地棕褐土	黑钙土	栗钙土
美制单位 K 值	0.401 0	0.257 0	0.527 0	0.171 0	0.423 0
国际制 K 值	0.052 8	0.033 8	0.069 4	0.022 5	0.055 7

注:K 值需要乘以单位转换系数 0.131 7(刘宝元的土壤侵蚀预测模型提供)统一到国际制单位(t·hm²·h·MJ⁻¹·hm⁻²·mm⁻¹)。

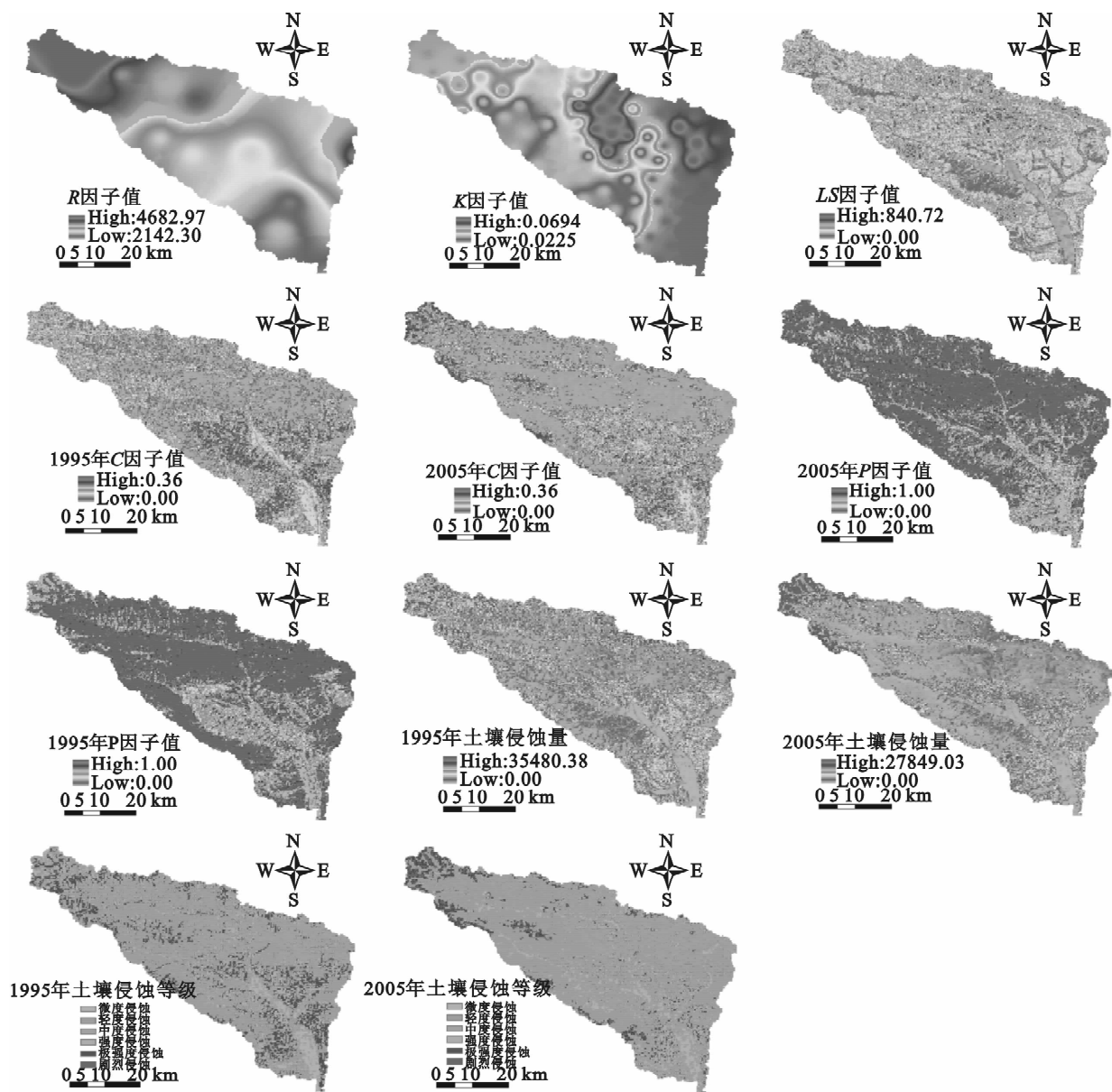


图 1 大通县土壤可蚀性空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of soil erodibility in Datong County

基于大通县森林资源规划设计调查成果(大通县林业局,2006),提取出林班调查图层中具有土壤类型及土壤质地的图斑作为样点,在 ArcMap 中生成土壤采样点状图,依据样点的土壤类型及质地,编辑其属性表赋于点图层不同土类 K 值,利用空间分析功能(spatial analyst)的反距离权重插值函数(inverse distance weighted)进行空间插值分析,求出每个栅格单元的土壤可蚀性因子 K 值,得到大通县土壤可蚀性空间分布图(图 1)。

2.3 地形因子 LS

在 RUSLE 模型中,地形对土壤侵蚀的影响用坡度(S)和坡长(L)因子计算,表示某种实际地形条件下的土壤流失量,与坡长 22.1 m、坡度 5.14°、其他所有条件都一致时的土壤流失量的比率^[4]。坡度和坡长属于加速土壤侵蚀的动力因子,下面根据不

同的运算表达式分别求出坡度和坡长因子值。

2.3.1 坡度因子 S 本研究使用分段的方法来考虑坡度对土壤侵蚀的影响,缓坡上选用 D. K. McCool^[7]等研究的坡度公式;陡坡上采用 B. Y. Liu^[8]等在黄土高原水土保持站的天然径流小区的观测资料建立的陡坡条件下的坡度因子 S 的算法,以此来提取坡度因子 S 值。

$$S=\begin{cases} 10.8\sin\theta+0.03 & \theta<5^{\circ} \\ 16.8\sin\theta-0.05 & 5^{\circ}\leq\theta\leq10^{\circ} \\ 21.92\sin\theta-0.96 & \theta>10^{\circ} \end{cases} \quad (4)$$

式中:θ为像元坡度。

以研究区 DEM 为基础数据,利用 ArcMap 空间分析功能(Spatial Analyst)中的 surface 分析工具提取出每个栅格单元的坡度,形成 S 图层,运用公式(4)在 raster calculator 中分段计算出大通县坡

度因子 S 值分布图。

2.3.2 坡长因子 L 采用 Wischmeier 和 Smith 提出的经验公式估算坡长因子 L 值^[9]:

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m$$
 (5)

式中: L 为坡长因子值; λ 是水平投影坡长(m);22.1 是 RUSLE 采用的标准小区坡长(m); m 是可变的坡长指数。

以研究区 DEM 为基础数据,利用 ArcMap 空间分析功能(Spatial Analyst)中的水文分析工具(Hydrology)提取出每个栅格单元的坡长即计算地面上每一点沿水流方向到该点所在流域出水口最大地面距离的水平投影。

坡长指数 m 与细沟侵蚀(由流水引起)和细沟间侵蚀(主要由雨滴打击引起)的比率有关,我国各地区可变坡长指数(m)值在 0.2~0.6 之间变化,考虑到大通县地处黄土高原的边缘、地形复杂坡度较陡;同时海拔高存在冻融耕作土壤,故参考刘宝元^[4]等(2001 年)研究成果,本文取值 $m=0.5$,利用 ArcMap 的 raster calculator 输入公式(5)运算得到大

通 L 值分布图。

由上面的坡度因子 S 值分布图及坡长因子 L 值分布图,通过栅格运算得到大通县地形因子 LS 的空间分布图(图 1)。

2.4 地表植被覆盖因子 C

植被覆盖和经营管理因子 C 是一个无量纲数,其值变化于 0~1 之间,具有人为可调控的特性,用以表明土地利用是如何影响土壤流失的,以及覆盖管理或水土保持措施在多大程度上抑制了土壤侵蚀^[10]。

本研究参考江忠善^[11-12]等、于东升^[13]等、蔡崇法^[14]等利用小区的试验资料计算得出的不同土地利用方式下的 C 值,参照 RUSLE 在美国盐湖城和丹弗的应用结果及 AM Korea Team 在亚洲的试验研究结果^[15]编制基于土地利用/覆被类型的 C 、 P 因子值表,结合大通县的土地利用及农业生产活动,估算研究区域的 C 值(表 2)。没有土壤侵蚀的地区赋值为 0,最易受到侵蚀的区域赋值为 1,以土地利用图层为基础,将 C 值赋予不同的土地利用类型,获得研究区 C 值分布的栅格图层(图 1)。

表 2 大通县不同土地利用类型的 C 因子值

Table 2 Land-cover C value of Datong County

土地利用类型	水浇地	旱地	有林地	灌木林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	水域	居民建设用地	裸岩石砾地	高原荒漠地
C 值	0.100	0.310	0.006	0.006	0.008	0.010	0.200	0.000	0.220	0.000	0.360

注:水浇地参考水田的 C 值;研究区旱地基本为坡耕地;裸岩石砾地虽然对土壤侵蚀的敏感程度很高,但是它基本无土壤层可以流失,所以赋值为 0;高原荒漠地参考潘竟虎^[17]等难利用地的 C 值。

2.5 土壤保持措施因子 P

参照国内以往的研究成果^[4,14,16-17],结合当地的土地利用及农业生产活动估算本研究区的 P 值。大通县水浇地地处川水地区的河谷滩地,有良好的排水措施一般采用带状耕作;旱地大都是自然山坡地,有部分旱地和牧草地沿着等高线或在其附近进

行平翻耕作,增加土壤湿度,减少径流量,以达到保持土壤的目的。河滩及沟谷平地的水浇地取值为 0.15,旱地和高覆盖度草地分别取值为 0.6、0.4(表 3)。将 P 值赋予不同的土地利用类型,获得研究区 P 值分布的栅格图(图 1)。

表 3 大通县不同土地利用类型的 P 因子

Table 3 Land-use of P factor in Datong County

土地利用类型	水浇地	旱地	有林地	灌木林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	水域	居民建设用地	裸岩石砾地	高原荒漠地
P 值	0.15	0.60	1.00	1.00	0.40	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

注:旱地 P 值取的是按照坡耕地和等高耕作农耕梯田的平均值;高覆盖度草地主要是由人工草地和采取一定措施的改良草地组成,故 P 值也是估算的平均值;裸岩石砾地虽然对土壤侵蚀的敏感程度很高,但是基本无土壤层可以流失,所以赋值为 0。

3 结果与分析

RUSLE 方程就是将所有因子相乘从而获得土壤流失量。将各因子图层转化为统一坐标系下网格大小为 10 m×10 m 的栅格图,利用 ArcGIS 软件的空间分析模块的 raster calculator 中进行复合运算,将各因子连乘,可以得到基于栅格的不同时期年土壤流失量图(图 1)。该图层每个单元格数值就是栅

格对应的的土壤侵蚀模数,根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96)^[18]对土壤侵蚀强度进行分级,生成研究区不同时期土壤侵蚀强度等级图(图 1)。

3.1 土壤侵蚀面积变化分析

从表 4 看出,从 1995 年到 2005 年大通县微度侵蚀区域和轻度侵蚀区域面积均呈现增长趋势,占研究区总面积比例分别由 30.45%、33.57%增加到

35.33%和 38.3%，分别增长了 4.88%和 4.73%；中度以上区域侵蚀面积均呈减少趋势，尤其是剧烈侵蚀面积减少幅度最大，减少了 6.41%。可见 1995 年到 2005 年土壤侵蚀有所减轻。

表 4 不同土壤侵蚀等级的面积

Table 4 Statistics for grade of soil-erosion area

侵蚀等级	侵蚀模数 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	1995 年		2005 年	
		面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
微度	<5	94 182.2	30.45	109 275.0	35.33
轻度	5~25	103 845.0	33.57	118 456.0	38.30
中度	25~50	31 699.6	10.25	29 787.7	9.63
强度	50~80	10 186.8	3.29	8 439.4	2.73
极强度	80~150	14 174.7	4.58	7 983.0	2.58
剧烈	>150	55 214.1	17.85	35 372.1	11.44

3.2 土壤侵蚀量变化分析

通过统计大通县 RUSLE 土壤侵蚀预测模型的运算结果表明,1995 年侵蚀总量为 2 938.17×10⁴ t,平均土壤侵蚀模数为 68.55 t·hm⁻²·a⁻¹;2005 年侵蚀总量为 2 160.07×10⁴ t,平均土壤侵蚀模数为 51.83 t·hm⁻²·a⁻¹。2005 年土壤侵蚀面积以微度和轻度为主,占到总侵蚀面积的 73.63%;研究区土壤侵蚀总量的 81.13%来源于仅占研究区侵蚀面积 11.44%的剧烈侵蚀区域;中度、强度和极强度侵蚀区的土壤流失量占研究区土壤侵蚀总量的 11.32%;而侵蚀面积最大的微度和轻度侵蚀区的土壤侵蚀量仅占研究区土壤侵蚀总量的 7.55%。

计算结果与大通县水务局 2006 年《大通水务祁连山南麓调查报告》中的调查结果比较吻合,这也说明使用遥感影像、在 GIS 技术支持下,采用 RUSLE 模型为研究区进行土壤侵蚀定量调查和监测是可行有效地途径(表 5)。

从表 5 可以看出,研究区土壤侵蚀发生了很大变化,平均土壤侵蚀模数 1995 年为 68.55 t·hm⁻²·a⁻¹属于强度侵蚀区,到 2005 年下降为 51.83 t·hm⁻²·a⁻¹,虽然仍属于强度侵蚀区但已经接近强度侵蚀区的下限;土壤流失总量由 1995 年的2 938.17×10⁴t 减少到 2005 年的 2 160.07×10⁴t,净减少量为 778.1×10⁴t;从 1995 年到 2005 年,微度侵蚀和轻度侵蚀的侵蚀总量呈现增加趋势,中度以上强度的侵蚀总量均呈现的下降趋势。这些与近些年来大通县实施“三北”防护林体系建设、天然林资源保护、退耕还林(草)以及国家重点生态环境治理等一系列林业和水保生态工程有着密切的关系^[19]。

3.3 土壤侵蚀等级的动态变化分析

在 ArcMap 空间分析(spatial analyst)功能的支持下,将 1995 年和 2005 年 2 期土壤侵蚀强度分级图进行栅格叠置运算,求得从 1995 年到 2005 年各级土壤侵蚀强度相互转换情况(表 6)。

表 5 不同土壤侵蚀等级的侵蚀量

Table 5 Statistics for grade of soil-erosion quantity

侵蚀等级	侵蚀模数 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	1995 年		2005 年	
		侵蚀模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀总量/10 ⁴ t	侵蚀模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀总量/10 ⁴ t
微度	<5	1.16	10.94	1.41	15.43
轻度	5~25	13.14	136.40	12.47	147.66
中度	25~50	34.32	108.80	34.34	102.28
强度	50~80	62.91	64.08	61.96	52.29
极强度	80~150	113.69	161.50	112.67	89.94
剧烈	>150	444.92	2 456.45	495.46	1 752.47
研究区		68.55	2 938.17	51.83	2 160.07

表 6 1995 年与 2005 年土壤侵蚀等级转换矩阵

Table 6 Conversion matrix between different grades of soil erosion from 1995 and 2005

hm²

侵蚀强度	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	1995 年
微度	75 369.58	7 744.89	1 866.81	1 087.76	1 260.56	6 852.66	94 182.24
轻度	14 313.67	69 979.76	8 574.57	347.22	1 408.53	9 221.57	103 845.31
中度	3 333.60	9 959.27	13 164.66	2 880.84	131.82	2 229.40	31 699.59
强度	3 603.67	714.41	1 950.71	3 083.17	516.43	318.36	10 186.76
极强度	7 291.77	1 728.46	159.85	413.80	4 323.81	257.00	14 174.68
剧烈	5 359.12	28 329.11	4 071.15	626.54	341.82	16 486.37	55 214.10
2005 年	109 271.40	118 455.89	29 787.73	8 439.33	7 982.97	35 365.36	309 302.68

总的来看,表 6 中矩阵对角线上的数据是 1995 年到 2005 年侵蚀强度数量没有发生变化的部分,合计 182 407.34 hm²;对角线两边的数据是 1995 年到 2005 年侵蚀强度发生相互转换的部分,合计 126 895.34 hm² 占研究区总面积的 41.03%,其中转换面积最大的是从 1995 年的剧烈侵蚀转化到 2005 年的轻度侵蚀 28 329.11 hm²,转换幅度达到 51.31%,占转换总数的 22.32%。

右上方三角矩阵的数据是 1995 年到 2005 年侵蚀强度级别增强的部分,合计侵蚀强度等级增强的面积为 44 698.41 hm²;左下方三角矩阵的数据是 1995 年到 2005 年侵蚀强度级别减小的部分,合计侵蚀强度等级减弱的面积为 82 196.93 hm²。

由以上分析看出,研究时段内研究区土壤侵蚀状况得到明显好转,退耕还林还草实施范围比较大,各种生态环境工程效果显著。但从另一方面也应看到,有 44 698.41 hm² 区域的土壤侵蚀强度呈现增强的趋势,主要是由于盲目挖金采药、虫害鼠害严重、城镇扩建、修路等活动增加等原因,使得土壤侵蚀在部分区域恶化^[2,19]。

参考文献:

[1] 罗利芳,张科利,孔亚平,等. 青藏高原地区水土流失时空分异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(1):58-62.
LUO L F,ZHANG K L,KONG Y P, *et al.* Temporal and spatial distribution of soil loss on Tibet-Qing Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(1):58-62. (in Chinese)

[2] 高国雄,张国良,刘美鲜,等. 国内外退耕还林研究与实践回顾[J]. 西北林学院学报,2007,22(2):203-208.
GAO G X,ZHANG G L,LIU M X, *et al.* Retrospect on the research and practice of the converting cropland to forest[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(2):203-208. (in Chinese)

[3] 丁万良. 青海土地资源[M]. 青海:青海人民出版社,1999:12.

[4] 刘宝元,谢云,张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京:中国科学技术出版社,2001.

[5] 王万中,焦菊英,郝小品,等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布[J]. 水土保持学报,1995,9(4):5-18.
WANG W Z,JIAO J Y,HE X P, *et al.* Study on rainfall erosivity in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1995,9(4):5-18. (in Chinese)

[6] 刘吉峰,李世杰,秦宁生,等. 青海湖流域土壤可蚀性 K 值研究[J]. 干旱区地理,2006,29(3):321-326.
LIU J F,LI S J,QIN N S, *et al.* Soil erodiable K in the catchment of Qinghai Lake[J]. Arid Land Geography,2006,29(3):321-326. (in Chinese)

[7] MCCOOL D K,BROWN L C,FOSTER G R, *et al.* Revised slope steepness factor for the universal soil Loss equation [J]. Transaction of the ASAE,1987,30(5):1387-1396.

[8] LIU B Y,NEARING M A,RISSE L M. Slope length effect

on soil loss for steep lope[J]. Transaction of the ASAE,1994,37(6):1835-1840.

[9] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses[R]. USDA Agriculture Handbook;US Department of Agriculture,1978:537.

[10] 许月卿,蔡运龙,彭建. 土地利用变化的土壤侵蚀效应评价:西南喀斯特山区的一个研究案例[M]. 北京:科学出版社,2008.

[11] 江忠善,王志强,刘志. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 水土保持学报,1996,2(1):1-9.
JIANG Z S,WANG Z Q,LIU Z. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the Loesa Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1996,2(1):1-9. (in Chinese)

[12] 江忠善,王志强,刘志. 应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究[J]. 水土保持研究,1996,3(2):84-97.
JIANG Z S,WANG Z Q,LIU Z. Study on the use of GIS to estimate soil erosion in a small watershed in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation,1996,3(2):84-97. (in Chinese)

[13] 于东升,史学正,吕喜玺. 低丘红壤区不同土地利用方式的 C 值及可持续性评价[J]. 水土保持学报,1998,4(1):71-76.
YU D S,SHI X Z,LY X X. C value of different land use patterns and its assessment on sustainability in low hill red soil area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1998,4(1):71-76. (in Chinese)

[14] 蔡崇法,丁树文,史志华. 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.
CAI C F,DING S W,SHI Z H. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2000,14(2):19-24. (in Chinese)

[15] 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.
LI Y H,WANG J,ZHANG J X. Calculation of soil water erosion modulus based on RUSLE and its assessment under support of artificial neural network[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006,17(6):1019-1026. (in Chinese)

[16] 潘尧虎,董晓峰. 基于 GIS 与 QuickBird 影像的小流域土壤侵蚀定量评价[J]. 生态与农村环境学报,2006,22(2):1-5.
PAN J H,DONG X F. GIS-and-QuickBird-Based quantitative assessment of soil erosion in small watershed[J]. Journal of Ecology and Rural Environent,2006,22(2):1-5. (in Chinese)

[17] 游松财,李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算—以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报,1999,14(1):62-68.
YOU S C,LI W Q. Estimation of soil erosion supported by GIS—A case study in Guanxi township, Taihe, Jiangxi[J]. Journal of Natural Resources,1999,14(1):62-68. (in Chinese)

[18] 中华人民共和国行业标准. 土壤侵蚀分类分级标准 SL190-96 [S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

[19] 贾俊姝,李文忠,高国雄,等. 大通县退耕还林不同配置模式物种多样性的研究[J]. 西北林学院学报,2006,21(3):1-6.
JIA J S,LI W Z,GAO G X, *et al.* Species diversity of different species arrangement models in converting cropland to forest in Datong,Qinghai[J]. Journal of Northwest Forestry University,2006,21(3):1-6. (in Chinese)