基于 RS 和 GIS 的陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀定量评价

王 娟, 卓 静

(陕西省农业遥感信息中心, 陕西 西安 710014)

摘 要: [目的] 分析陕北黄土高原退耕还林区 2000,2007 和 2012 年土壤侵蚀量时空变化特征,为该地区开展退耕还林(还草)工程提供参考。[方法] 在 GIS 和 RS 的技术支持下,以陕北黄土高原退耕还林区为研究区域,应用美国通用土壤流失预报方程(RUSLE 模型)为评价模型,利用 ArcGIS 9.2 的栅格数据空间分析功能,对研究区域 2000,2007 和 2012 年土壤侵蚀强度进行了估算,在此基础上分析了其时空变化特征。[结果] 陕北黄土高原退耕还林区 2000—2012 年土壤侵蚀量呈下降趋势,2012 年较 2000 年下降了 1 162 t/(km^2 · a);以子长县为例,2000 年土壤侵蚀模数在 2 500 t/(km^2 · a)以下的面积仅占区域总面积的 0.1%,2012 年上升为 55.2%;2000 年研究区主要土壤侵蚀强度为中度侵蚀,2012 年为轻度侵蚀,变化剧烈的区域主要集中在黄土高原丘陵沟壑区的子长、安塞、志丹等县。[结论] 植被覆盖因子是影响区域内土壤侵蚀的最主要因素,由此可见大力开展退耕还林(还草)工程可以有效抑制区域内土壤侵蚀状况。

关键词: 陕北; 黄土高原; 退耕还林区; 土壤侵蚀; 定量分析

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2015)01-0220-04 **中图分类号**: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.041

Quantitative Assessment of Soil Erosion in Areas Under Grain for Green Project in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province Based on GIS and RS

WANG Juan, ZHUO Jing

(*Remote Sensing Information Center for Agriculture in Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi* 710014, *China*)

Abstract: [Objective] To analyze the temporal and spatial variability of soil erosion intensity in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province in 2000, 2007 and 2012, and to provide the support for the implementation of grain for green project in this region. [Methods] With the support of GIS and RS technology, we conducted a quantitative research based on the RUSLE model and ArcGIS 9.2 and analyzed the temporal and spatial variability of soil erosion intensity in Northern Shaanxi in 2000, 2007 and 2012. [Results] During the 13 years, soil erosion tended to decrease over time, and the soil erosion in 2012 dropped by 1 162 t/(km^2 · a) compared with 2000. Compared with the 2% of the total area in 2000, the area with an erosion modulus less than 2 500 t/(km^2 · a) in Zichang County accounted for 26% in 2012. The soil erosion was moderate in 2000, but was slight in 2012 in most areas. The drastic change mainly occurred in the hilly areas in Zichang, Ansai and Zhidan Counties. [Conclusion] Vegetation coverage was the main factor affecting the soil erosion, and conversion of slope cropland to forest or pasture is playing an important role in decreasing soil loss.

Keywords: Northern Shaanxi Province; Loess Plateau; grain for green area; soil erosion; quantitative assessment

土壤侵蚀是当今世界各国的主要环境问题,它严重威胁着人类的生存和发展,它不但破坏了生态环境平衡,还能加剧干旱、洪涝等气象灾害的发生。黄土高原退耕还林区由于其形成的自然条件,极易发生水土流失等一系列的环境灾害,是中国水土流失最为严重的地区。目前在该地区实施 14 a 之久的退耕还林(还草)工程为抑制侵蚀、减少水土流失提供有效措施。退耕还林(还草)工程使植被覆盖、土地利用状况发生改变,土壤侵蚀有所减轻[1],黄河中游地区经过十几年的水土流失治理,使黄河输沙量平均每年减少 3.00×10^8 t[2]。近些年,随着遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术的发展,在世界许多国家广泛应用土

收稿日期:2013-12-19 **修回日期**:2014-01-29

资助项目:陕西省气象局研究型业务重点科研项目"GIS 和 RS 支持下的陕北地区生态环境脆弱性评价"(2013z-7)

第一作者:王娟(1981—),女(满族),陕西省西安市人,硕士研究生,工程师,研究方向为卫星遥感应用。E-mail:wangj_81@126.com。

通信作者:卓静(1978—),女(汉族),陕西省西安市人,硕士研究生,高级工程师,研究方向为卫星遥感应用。E-mail:79506610@qq.com。

壤流失预报方程估算土壤侵蚀及其时空变化[3]。在中国对土壤流失预报方程的研究与应用起步较晚,研究主要集中在流域内的土壤侵蚀的时空变化[4]及土地利用类型与土壤侵蚀的时空变化之间的关系等方面[5],对大面积区域的土壤侵蚀的时空变化及影响因子研究较少。

为了反映退耕还林(还草)工程十几年来取得的成效,本文利用通用土壤流失方程(RUSLE),以陕北黄土高原退耕还林区为研究区域,对该地区 2000,2007 和 2012 年 3 a 的水土流失强度及其时空特征进行分析讨论。

1　研究区概况与数据

1.1　研究区概况

黄土高原是中华文明的发祥地,是梁峁丘陵沟壑发达的典型区域,陕北退耕还林区位于延安市北部地区和榆林市南部地区,共辖 20 个县(区),总面积达 45 257.60 km^2,总人口约为 400 万人;土壤类型以黄绵土为主;地表被流水侵蚀切割得支离破碎,相对高差多在 100～150 m,坡度以 15°～20°最为普遍;研究区属于干旱季风气候,降水年际变化大,多年平均降雨量 478.3 mm,7—9 月降水量可占年均降雨量的 62.4%,且强度集中。受到地形破碎、土质疏松、降雨集中等自然因素和乱砍乱伐、过度放牧、陡坡开垦等人为因素的影响,区域内主要的侵蚀类型为水力侵蚀。陕北退耕还林区水土流失严重,是目前水土保持的重点治理区域。

1.2　数据来源

本研究采用的数据包括:黄土高原退耕还林区 85 m 分辨率 DEM;2009 年发布的基于世界土壤数据库的中国土壤数据集(V1.1),空间分辨率 1 000 m;由中国科学院遥感所提供的 2000 年分辨率为 1 km 土地利用数据;研究区及其附近周边区域的 20 个气象站 1997—2012 年的日降雨资料;MOD13 Q12000—2012 年数据集,其空间分辨率为 250 m×250 m,时间分辨率为 16 d;为了便于各要素图层间的运算,所有的图层都将投影转换成 Transverse Mercator 横轴墨卡托投影,各图层栅格尺寸为 85 m。

2　研究方法

2.1　计算模型

考虑到研究者目前对该区水土保持基础数据的占有情况和研究时段长短的基本一致,选择了 2000,2007 和 2012 年的数据进行研究。

本文根据修正后的通用土壤流失预报方程(RUSLE)[6]并且根据研究区特点确定不同因子的算法,最后估算退耕还林区的土壤侵蚀量。公式如下:

$$A=K\cdot R\cdot L\cdot S\cdot C\cdot P \tag{1}$$

式中:A——年均土壤流失量〔t/(hm^2 · a)〕;K——土壤可蚀性因子〔t · h/(MJ · mm)〕;R——降雨侵蚀因子〔MJ · mm/(hm^2 · h · a)〕;LS——地形因子;L——坡长因子;S——坡度因子;C——植被覆盖因子;P——水土保持措施因子。除 K 因子和 R 因子外,其他因子均为无量纲因子[7]。

2.2　研究方法

2.2.1　**土壤可蚀性因子(K)估算**　RUSLE 中,K 因子是土壤性质对由降雨、坡度坡长、植被覆盖等各个因素所产生的侵蚀力敏感程度的指标,受土壤类型、结构和土壤剖面渗透力等各方面因素影响。本研究采用 Williams 等[8]在 EPIC 模型中提出的 K 值估算方法,其计算式如下:

$$\begin{aligned}K=&\{0.2+0.3\exp[-0.025\,6t_{sd}(1-t_{st}/100)]\}\times\\&(t_{st}/t_{cy}+t_{st})^{0.3}\times\\&\{1-[0.025\mathrm{toc}/\mathrm{toc}+\exp(3.72-2.95\mathrm{toc})]\}\times\\&\{1-[0.7t_n/t_n+\exp(-5.51+22.9t_n)]\}\end{aligned} \tag{2}$$

式中:t_{sd}——土壤沙粒质量分数;t_{st}——土壤粉粒质量分数;t_{cy}——土壤黏粒质量分数;t_{oc}——有机碳质量分数(%);$t_n=1-t_{sd}/100$。

采用中国科学院寒区旱区研究所数据中心下载的 2009 年基于世界土壤数据库的中国土壤数据集(V1.1),由公式(2) 可计算得出 K 因子栅格图层,K 值介于 0.008 9～0.046 3 。

2.2.2　**降雨侵蚀力因子(R)的计算**　降雨侵蚀力反映由降雨因素产生的土壤侵蚀力,该因子与降雨量、降雨强度、降雨类型等有关,RUSLE 中经典算法是以次降雨资料为基础,利用 30 min 最大降雨强度和动能相乘得到降雨侵蚀力[9-10]。由于本研究中气象资料缺少雨强和降雨次数等资料,采用基于日降雨统计资料来评估计算降雨侵蚀力。

$$R=\alpha\sum_{y=1}^{i}(A_y)^{\beta} \tag{3}$$

$$\beta=0.836\,3+18.144a_{d12}^{-1}+24.455A_{y12}^{-1} \tag{4}$$

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891} \tag{5}$$

式中:R——年平均降雨侵蚀力〔MJ · mm/(hm^2 · h · a)〕;i——1 a 内的天数(d);A_y——年内第 y 日侵蚀性降雨量(mm),$A_y>12$ mm,否则按 0 计[11];a_{d12}^{-1}——日雨量在 12 mm 以上的日均降雨量(mm);A_{y12}^{-1}——日雨量在 12 mm 以上的年均降雨量(mm);α,β——模型参数。

利用降雨侵蚀力的计算模型及研究区及其附近周

边区域的20个气象站15 a的日降雨资料，分别计算各站点各年的降雨侵蚀力，通过克里金内插法获得流域各年R值图。2000年，区域内降雨侵蚀力最大值，最小值及平均值分别为1 712.91，239.31及640.00 MJ·mm/(hm²·h·a)，2007年分别为3 228.82，714.56及1 487.13 MJ·mm/(hm²·h·a)，2012年分别为3 092.10，1 329.42及2 056.78 MJ·mm/(hm²·h·a)。由结果可以看出，2012年年均R值要高于其他两年，降雨侵蚀力呈逐年上升趋势。

2.2.3 坡度坡长因子(LS)的计算 地形因子属于土壤侵蚀的加速因子，利用区域DEM数据采用RUSLE中的计算方法[12]，可求得流域LS专题层。

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.036 & (\theta<5^\circ)\\ 16.8\sin\theta-0.5 & (5^\circ\leqslant\theta<10^\circ)\\ 21.9\sin\theta-0.96 & (10^\circ\leqslant\theta)\end{cases} \tag{6}$$

$$L=(\lambda/22.1)^m \quad \left[m=\begin{cases}0.2 & (\theta\leqslant1^\circ)\\ 0.3 & (1^\circ<\theta\leqslant3^\circ)\\ 0.4 & (3^\circ<\theta\leqslant5^\circ)\\ 0.5 & (\theta\geqslant5^\circ)\end{cases}\right] \tag{7}$$

利用陕西省85 m分辨率DEM，在ArcGIS中进行投影转换及掩膜裁剪，并生成区域坡度图，利用公式(6)，(7)，计算得出LS图层。

2.2.4 植被覆盖因子(C)的计算 C因子指在其他条件都相同时，某一特定作物或植被下的土壤流失量与持续休闲的土壤流失量的比值；是土壤侵蚀的抑制因素之一，与土壤侵蚀量成反比。在没有受到任何土壤侵蚀时为0，而土地利用类型为裸地时值为1。

本文采用MODIS数据产品MOD13 Q12000—2012年数据集，应用ERDAS软件建模进行最大值合成，得到退耕还林区2000，2007和2012年3 a的NDVI值，并根据公式计算该区域植被覆盖度[13]，最后应用植被覆盖因子的拟合公式[14]：

$$C=1-F_c+\varepsilon \tag{8}$$

式中：ε——一正小常数，取0.001。计算得到3 a的C因子图层；F_c——植被覆盖度(%)。

2.2.5 水土保持措施因子(P)的计算 P因子是土壤侵蚀动力的抑制因子，可反映出植被以及相应管理措施对土壤流失量的影响，P因子值在0～1之间，由于缺少作物水土保持方面的数据，因此假定：森林、草地、未利用地、城镇建设用地的P值为1，没有侵蚀的地区为0，平原及没有坡度的农田取值为0.1，其他用坡度值换算[13]。

本文根据土地利用类型图对相应类型进行赋值(表1)[15]。得到区域内P因子图层。

表1 陕北黄土高原退耕还林区耕地不同坡度下耕作措施因子值

坡度范围	≤5°	5°～10°	10°～15°	15°～20°	20°～25°	>25°
耕作措施因子	0.100	0.221	0.305	0.575	0.735	0.800

3 分析与讨论

3.1 土壤侵蚀模数分析

利用RUSLE方程计算各个因子，并将各个因子图层进行叠加相乘，便可计算出2000，2007年和2012年流域土壤侵蚀量(附图12—15)，计算结果表明：

(1) 区域内2000年较2012年土壤侵蚀估算量大，2000年区域内平均侵蚀模数为3 336 t/(km²·a)，2007年为2 174 t/(km²·a)，2012年为2 097 t/(km²·a)；使用简单差值法将2012及2000年栅格图像进行相减，生成了13 a陕北退耕还林区土壤侵蚀模数变化特征空间分布图(图4)，变化主要集中在−3 000～0 t/(km²·a)之间，表明，研究区域内2012年土壤侵蚀模数较2000年土壤侵蚀模数小，2012年区域内土壤侵蚀情况较2000年得到较好的抑制。

(2) 由图4可看出，近10 a变化最大的区域主要集中在府谷、安塞、志丹、吴起及子长等县，这些地区地形破碎、沟壑发育、水土流失极其严重，生态环境极其脆弱，但经过退耕还林还草工程后，大部分地区差值在−4 000 t/(km²·a)以上，可见，这些区域在退耕还林(还草)工程下，植被覆盖度大幅增加，水土保持措施得当，侵蚀量大幅下降，水土流失情况得到很好的抑制，生态环境得到很大改善；应用陕西省边界矢量数据在ArcGIS中掩膜提取各县土壤侵蚀模数，得到区域内各县的逐年土壤侵蚀模数图。例如子长县，2000年土壤侵蚀模数平均值为4 936 t/(km²·a)，而2012年平均土壤侵蚀模数降低到2 208 t/(km²·a)，10 a间降幅达到50%以上，2000年时土壤侵蚀模数在2 500 t/(km²·a)以下的面积仅占总面积的0.1%，2012年已占总面积的55.2%；2000年侵蚀量在5 000 t/(km²·a)以上的面积达到总面积的42%，2012年土壤侵蚀模数均在5 000 t/(km²·a)以下。

3.2 土壤侵蚀强度分析

按照水利部颁发的土壤侵蚀强度等级划分标准对土壤侵蚀量进行重分类，得到陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀强度等级分级表(表2)。

表 2　陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀强度所占面积比

年份	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀
2000	0.01	0.35	0.55	0.09	无
2007	0.13	0.65	0.21	0.01	无
2012	0.12	0.68	0.20	无	无

结果表明:2000—2012 年退耕还林区微度侵蚀所占面积显著增加,强烈侵蚀所占面积在大幅减少。2000 年主要土壤侵蚀等级为中度侵蚀,且强烈侵蚀面积占区域面积的 9%,2012 年主要侵蚀等级为轻度侵蚀,占区域面积的 68%;子长县尤为明显,退耕还林工程开展之前,轻、中度侵蚀所占面积占区域总面积的 58%,强烈侵蚀占区域总面积的 9%,2012 年区域内土壤侵蚀情况得到了很好的抑制,强烈侵蚀等级已经消失,中度侵蚀面积占区域总面积的 68%,区域内生态环境正朝良性发展。

3.3　降雨、植被覆盖度及水土保持措施对土壤侵蚀量的影响

由土壤侵蚀方程可以看出,土壤侵蚀估算量是由多因素共同作用而得到的,仅看某一自然因素或某一人为因素都无法正确的表述土壤侵蚀的程度。本文分别模拟在不同条件下 2012 年的土壤侵蚀情况。结果表明:

(1) 应用土壤侵蚀方程计算出 2000 与 2012 年的土壤侵蚀量,分别为 3 336 和 2 174 t/(km^2 · a)。

(2) 只改变降雨侵蚀力因子,其他因子不变的情况下,应用 2000 年降水侵蚀力计算 2012 年土壤侵蚀量为 1 806 t/(km^2 · a),较实际估算值减少了 17%。

(3) 只考虑植被覆盖管理因子,其他因子不变的情况下,应用 2000 年植被覆盖度计算 2012 年土壤侵蚀量为 3 302 t/(km^2 · a),较实际计算量增加了 52%。

(4) 只考虑水土保持措施因子,其他因子不变的情况下,应用 2000 年水土保持措施因子,计算 2012 年土壤侵蚀量为 2 432 t/(km^2 · a),较实际值增加了 12%。

通过对结果比较分析,2000 年降雨侵蚀力小于 2012 年,这是由于 2012 年区域内降雨强度和降雨量都大于 2000 年,降雨侵蚀力是土壤侵蚀方程中的加剧因子,因此应用 2000 年的降雨侵蚀力计算 2012 年土壤侵蚀量较实际值偏小;植被覆盖因子是土壤侵蚀中的抑制因子,2000 年该地区植被覆盖度明显低于 2012 年,因此计算出模拟值明显高于实际值,水土保持措施使该区域土壤侵蚀情况得到了抑制,因此应用 2000 年的水土保持措施因子计算出的模拟值较实际值偏大;降雨侵蚀力、植被覆盖度、水土保持措施三因子均对土壤侵蚀有所影响,三因子共同作用时土壤侵蚀量较实际值增大了 47%,其中只考虑植被管理因子计算得出的土壤侵蚀量较实际值增加了 52%,对土壤侵蚀量的变化影响最大。因此,大力发展退耕还林(还草)工程,改变区域内植被覆盖状况,可大大改善退耕还林区水土流失状况及生态环境。

4　结 论

通过运用修正后的通用土壤流失预报方程(RUSLE)估算研究区各个因子及土壤侵蚀量,并分析了土壤侵蚀量的时空变化及各因子的影响。研究表明退耕还林(还草)工程开展的十几年间,陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀量呈下降趋势,区域内主要侵蚀等级由中度侵蚀下降为轻度侵蚀;降雨、植被覆盖管理因子及水土保持措施因子均对土壤侵蚀产生影响,但植被覆盖管理因子对土壤侵蚀量变化影响最大;由于研究区域土壤侵蚀的主要原因包括强季风对覆被状况较差的地表引起的风蚀和暴雨流水对黄土高原的冲刷及切割的水力侵蚀,因此,通过退耕还林(还草)工程改善地表覆被状况,逐渐改变区域内耕种习惯,都会使研究区域的水土流失状况及生态环境得到很大改善。

本研究的不足之处在于计算中使用的土地利用数据为 2000 年数据,由于近十几年来陕北退耕还林区土地利用变化较大,2007 和 2012 年土壤侵蚀值可能偏大,没有充分地反映退耕还林工程所取得的成效。

[参 考 文 献]

[1] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等. 延河流域退耕前后土壤侵蚀强度的变化[J]. 中国水土保持科学,2007,5(4):27-33.

[2] 陈雷. 中国的水土保持[J]. 中国水利,2002(6):9-11.

[3] 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.

[4] 吴艳,张晓萍,陈凤娟,等. 陕北典型流域退耕后土壤侵蚀及空间分布初步调查研究[J]. 水土保持研究,2010,17(4):29-33.

[5] 汤丽洁,舒畅. 基于 GIS 和 RS 的巢湖流域水土流失评估[J]. 水土保持通报,2013,23(1):305-308.

[6] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Prediction rainfall erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1997.

(下转第 229 页)

opment and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins [J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(3/4):334-346.

[6] Chua Lloyd H C, Wong Tommy S W, Wang X H. Information recovery from measured data by linear artificial neural networks: An example from rainfall-runoff modeling[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(1): 373-381.

[7] 赵雨森,魏永霞.黑龙江省西部半干旱区土壤水分入渗规律及其模拟研究[J].灌溉排水学报,2008,27(4):110-112.

[8] 姜秋香,付强,王子龙.黑龙江省西部半干旱区土壤水分空间变异性研究[J].水土保持学报,2007,21(5):118-122.

[9] 魏永霞,张忠学,王立敏.半干旱区坡耕地抗旱保水技术集成对大豆水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2007,26(6):73-75,82.

[10] 王宇,陈丽华,杨启红,等.东北半干旱区主要农田防护林树种蒸腾速率研究[J].水土保持通报,2008,28(4):48-51.

[11] 刘新宇,赵岭,王立刚,等.阿伦河流域水土保持林土壤抗蚀性研究[J].防护林科技,2000(3):21-23.

[12] 王继常,李利.梅里斯阿伦河流域生物治理工程的探讨[J].防护林科技,2014(3):100-101.

[13] 张玉峰.甘南县阿伦河流域水环境质量现状、变化趋势及防治对策[J].黑龙江环境通报,2012,36(4):35-26,39.

[14] 周方录,黄金柏,王斌.基于栅格的不规则断面水深—流量关系曲线确定方法[J].水资源研究,2013(2):109-113.

[15] Yomoto A, Islam M N. Kinematic analysis of flood runoff for a small-scale upland field[J]. Journal of Hydrology, 1992,137(1/4):311-326.

[16] Chua Lloyd H C, Wong Tommy S W, Sriramula L K. Comparison between kinematic wave and artificial neural network models in event based runoff simulation for an overland plane[J]. Journal of Hydrology, 2008,357(3/4):337-348.

[17] Cabral M C, Garrote L, Bras R L, et al. A kinematic model of infiltration and runoff generation in layered and sloped soils[J]. Advances in Water Resources, 1992,15(5):311-324.

[18] Sarkar R, Dutta S. Field investigation and modeling of rapid subsurface storm flow through preferential pathways in a vegetated hillslope of Northeast India[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012,17(2):333-341.

[19] Huang Jinbai, Hinokidani O, Yasuda H, et al. Study on characteristics of the surface flow of the upstream region of Loess Plateau[C]. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 2008,52:1-6.

[20] 黄金柏,王斌,桧谷治,等.耦合融雪的分布式流域"降雨—径流"数值模型[J].水科学进展,2012,23(2):194-199.

[21] Huang Jinbai, Hinokidani O, Yasuda H, et al. Effects of the check dam system on water redistribution in the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013,18(8):929-940.

[22] Huang Jinbai, Wen Jiawei, Hinokidani O, et al. Runoff and water budget of the Liudaogou Catchment at the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(9):3623-3633.

(上接第 223 页)

[7] Zhou Ping, Meng Jijun. 鄂尔多斯市 1988—2000 年土壤水力侵蚀与土地利用时空变化关系[J].自然资源学报,2009,24(10):1706-1717.

[8] Wischmeier W H. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains[M]. USDA Agricultural Handbook, 1965.

[9] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.

[10] 谢红霞,杨勤科,李锐,等.延河流域水土保持措施减蚀效应分析[J].中国水土保持科学,2010,8(4):13-19.

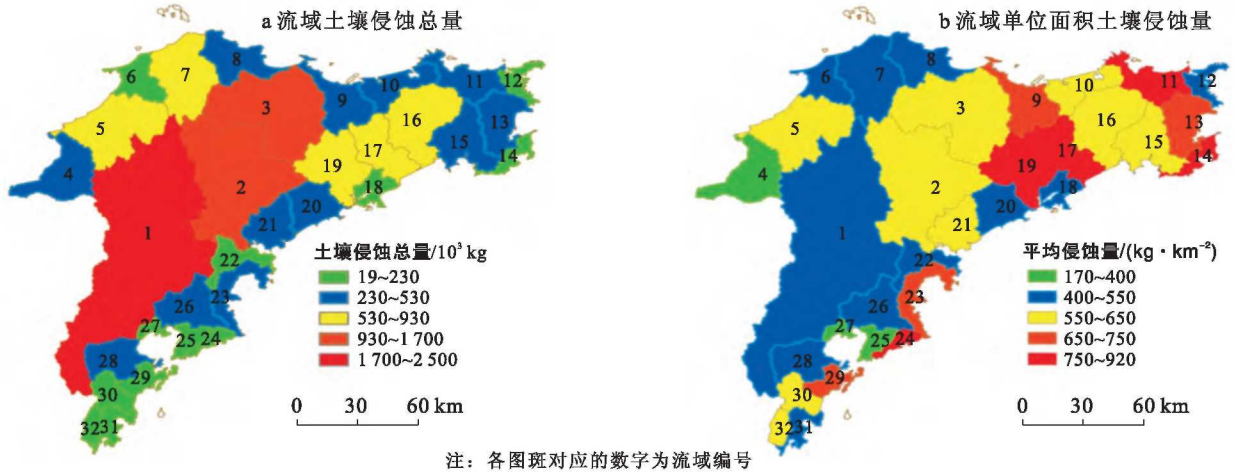
[11] 谢云,刘宝元.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.

[12] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等.基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J].水土保持通报,2010,30(2):203-206.

[13] 赵时英.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003.

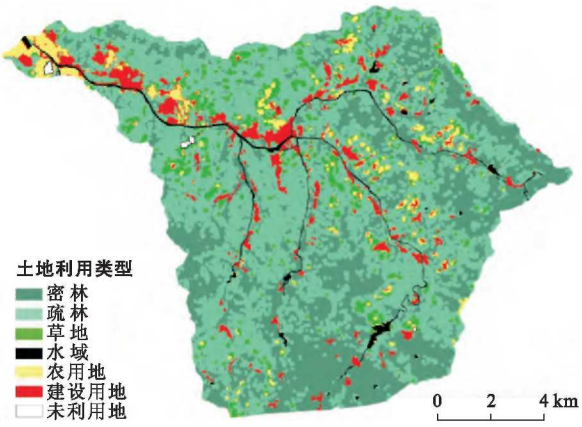
[14] 郑度.青藏高原隆升与环境效应[M].北京:科学出版社,2004.

[15] 高江波,周巧富,常青.基于 GIS 和土壤侵蚀方程的农业生态系统土壤保持价值评估:以京津冀地区为例[J].北京大学学报:自然科学版,2009,45(1):151-157.

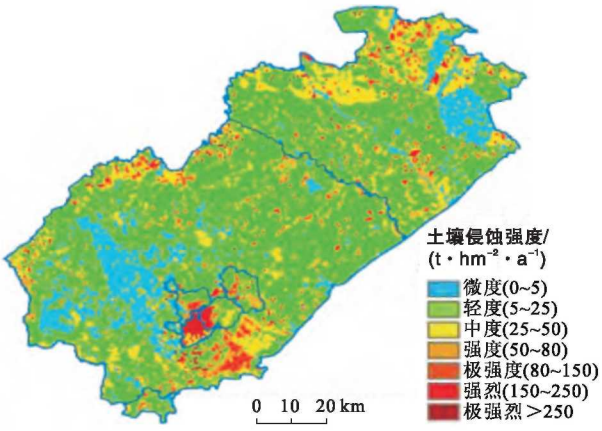


注：各图斑对应的数字为流域编号

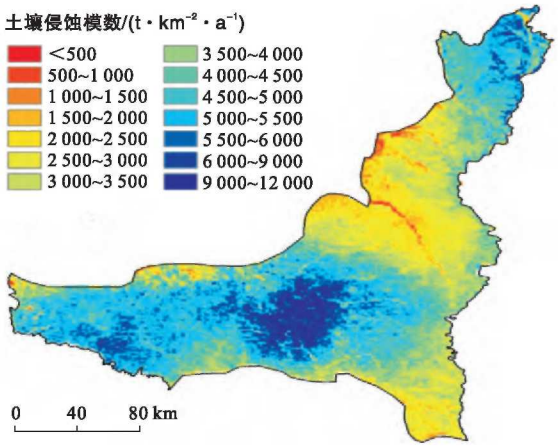
附图9　胶东半岛不同流域土壤侵蚀量空间分布(190页)



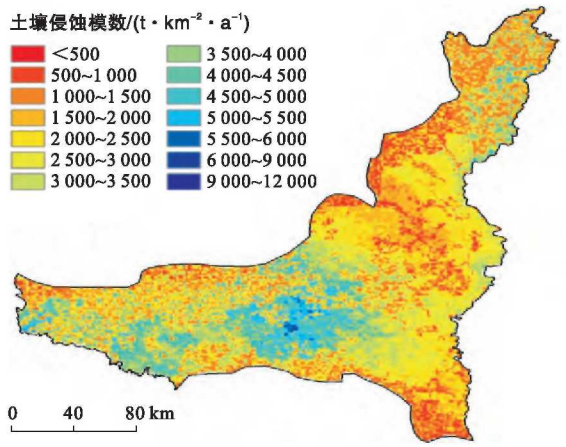
附图10　山东省济南市锦阳川流域土地利用类型(195页)



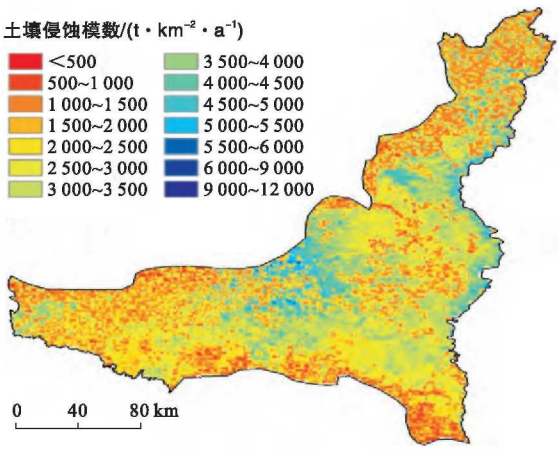
附图11　辽宁省阜新市土壤侵蚀强度分级(202页)



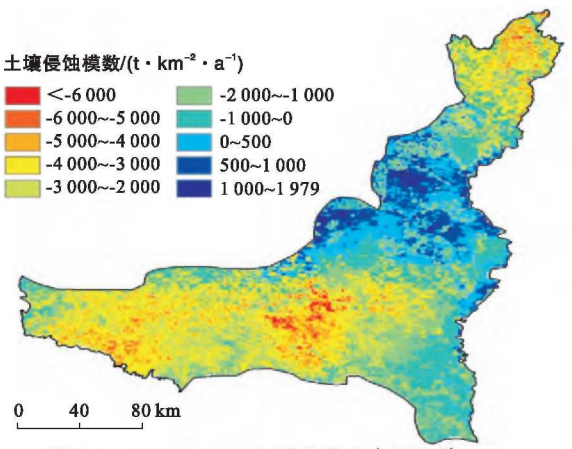
附图12　2000年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图13　2007年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图14　2012年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图15　2000—2012年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数差值示意图(222页)