

# 皇甫川流域土地利用变化与土壤侵蚀评价

喻 锋<sup>1,2</sup>, 李晓兵<sup>1\*</sup>, 陈云浩<sup>1</sup>, 王 宏<sup>1</sup>, 杨明川<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学资源学院, 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 国土资源部信息中心, 北京 100812)

**摘要:** 基于“3S”技术, 揭示了皇甫川流域近十多年来的土地利用变化情况, 并采用通用土壤侵蚀方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)定量研究了不同土地利用背景下的土壤侵蚀分布规律。结果表明, 近十几年来流域土地利用变化剧烈, 其总体趋势是城镇用地、林地、耕地和灌丛的面积逐渐增加(速率依次减小), 水体、草地、沙地和裸砒砂岩面积逐渐减小(其中水体缩减的幅度最大), 土地利用格局持续承受着来自当地快速城市化进程及社会经济发展和生态环境保护及建设两方面相互矛盾的巨大压力; 与此同时, 流域土壤侵蚀模数由 1987 年的 16160.72t/km<sup>2</sup> 减少到 2000 年的 13943.32t/km<sup>2</sup>, 其中 6 种不同土地利用类型在同一年份内土壤侵蚀模数的大小顺序为裸砒砂岩> 沙地> 耕地> 草地> 林地> 灌丛, 表明林、灌措施是流域植被恢复和减少土壤侵蚀的首选, 草地限制土壤侵蚀的效果也较为明显, 而沙地尤其是分布面积较广的裸砒砂岩则是土壤侵蚀综合治理的难题和关键; 虽然十几年来水土流失综合治理效果显著, 但由于裸砒砂岩和沙地的面积仍在整个流域占有相当的比例以及耕地剧增等因素, 土壤侵蚀模数仍明显高于流域土壤允许侵蚀的临界值, 流域生态环境仍然处于不安全状态, 有必要对未来土地利用格局进行优化以确保生态安全。最后, 在讨论中阐明了流域土地利用格局调整和优化的方向。

**关键词:** 皇甫川流域; 土地利用变化; 土壤侵蚀评价

文章编号: 1000-0933(2006)06-1947-10 中图分类号: Q143, Q149, S159.2 文献标识码: A

## Land use change and soil erosion evaluation in Huangfuchuan Watershed

YU Feng<sup>1,2</sup>, LI Xiao-Bing<sup>1,\*</sup>, CHEN Yun-Hao<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>, YANG Ming-Chuan<sup>1</sup> (1. College of Resource Sciences and Technology of Beijing Normal University, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing 100875, China; 2. Information Center of Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1947-1956.

**Abstract:** Supported by “3S” technology, this paper brought forth the land use change in Huangfuchuan Watershed from 1987 to 2000, then studied the distribution rules of soil erosion under different land use patterns quantitatively by Universal Soil Erosion Equation (USLE) during that period, and emphasized the impact of changes of land use pattern on soil erosion in the watershed.

The results showed: (1) In the recent ten years, the general tendency of land use change in the study area was that the proportion of urban land, woodland, cropland and shrub increased gradually with the speed descending, and that the proportion of water, grassland, sandy land and bare rock shrunk with the highest extent of water. During this course, the watershed pattern of land use was under the tremendous pressure from the standing conflict, which burst out between the rapid urbanization, economic development and the conservation and rebuilding of ecological environment. This status would survive for a long time in the future, and moreover, the distinct decline of water area would be the bottleneck of above contradiction; (2) With the change of land use pattern, the annual modulus of soil erosion decreased rapidly from 16160.72t/km<sup>2</sup> in 1987 to 13943.32t/km<sup>2</sup> in 2000. According

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018600); 国家教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET\_04\_0149)

收稿日期: 2005-04-02; 修订日期: 2005-10-17

作者简介: 喻锋(1981~), 男, 湖南武冈市人, 硕士, 主要从事土地利用及应用遥感研究. E-mail: fyu@infomail.mlr.gov.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xbli@ires.cn

**Foundation item:** The project was supported by National Key Projects for Basic Research in China(No. G2000018600); Supported by Program for New Century Excellent Talents in University of China(No. NCET\_04\_0149)

**Received date:** 2005-04-02; **Accepted date:** 2005-10-17

**Biography** YU Feng, Master, mainly engaged in land use and applied remote sensing. E-mail: fyu@infomail.mlr.gov.cn

to the annual modulus of soil erosion in the same year, different land use types in Huangfuchuan Watershed arrayed with the order: bare rock > sandy land > cropland > grassland > woodland > shrub, indicating that woodland and shrub were the preferred measures for vegetation restoration and the reduction of soil erosion. Furthermore, the alteration of sandy land and bare rock would be the key problem of comprehensive harnessment of soil erosion, which could not be overlooked; (3) The effect of soil and water conservation was significant in the recent ten years, however, due to the high proportion of sandy land and bare rock and the proliferating cropland in the watershed, the annual modulus of soil erosion were still higher than permissible soil erosion amount between 3700t/km<sup>2</sup> and 6900t/km<sup>2</sup>. The ecological environment of watershed would be in the status of insecurity, thus, the watershed pattern of land use must be optimized to meet the requirement of ecological security.

Generally, this paper emphasized the impacts of different land use types and patterns on soil erosion of watershed, illuminated the adjustment or optimization of land use pattern, and improved the technical system of soil erosion assessment for the simulation and forecasting of land use change, which has wide application in the future.

**Key words:** Huangfuchuan Watershed; land use change; soil erosion evaluation

地球表层系统最突出的景观标志就是土地利用与土地覆盖,土地利用/覆盖变化与生态环境安全水平密切相关<sup>[1,2]</sup>。作为区域生态安全的重要影响因子,土壤侵蚀是导致土地资源退化、生态系统受损的主要原因,这种影响在世界范围内由于土地利用/覆盖变化强度的加剧而日益凸现。由此可见,土地利用/覆盖变化与土壤侵蚀密切相关:土地利用/覆盖变化改变原有地表植被类型及其覆盖度和微地形,从而影响土壤侵蚀的动力和抗侵蚀阻力系统,成为土壤侵蚀的诱发和强化因素,在区域土壤侵蚀的发展中起重要作用<sup>[3]</sup>;土壤侵蚀的加剧反过来又限制土地利用的方式和结构,导致土地生产力退化,进一步激化人地矛盾。因此,有必要深入研究土地利用变化与土壤侵蚀时空动态分异规律。

在土壤侵蚀与土地利用变化的交叉研究上,传统的径流小区法最早被用于研究不同土地利用类型的水土流失特征(如地表径流系数、土壤侵蚀模数、有机质流失量等),并以此来决定土壤侵蚀模型各侵蚀因子在不同土地利用类型下的赋值。如阮伏水在福建花岗岩坡地的土壤侵蚀试验结果表明,香根草带间作和牧草覆盖等土地利用方式相比于松耕具有良好的水土保持效益,而在利用 USLE 进行土壤侵蚀预测时未扰动自然裸露坡地的地表覆盖因子取值应在 0.1~0.3 之间<sup>[4]</sup>。王本贤等通过野外径流观测和有机质流失测定研究了苏南丘陵区不同土地利用状况的蓄水保土功能<sup>[5]</sup>;傅伯杰等则采用在流域出口建坝观测和样地实测的方法,在校正 LISEM(Limburg Soil Erosion Model)模型的基础上模拟了不同土地利用方案的水土流失效应<sup>[6]</sup>。相比之下,土壤侵蚀元素示踪法可以弥补径流小区法不能得到区域土壤侵蚀空间分异规律的不足,能获得不同时间跨度、不同土地利用类型的侵蚀和沉积结果。在此基础上,杨武德等探讨了红壤坡地不同土地利用方式下土壤侵蚀的时空分布规律,并相应提出了合理的耕作制度和有效的水土保持措施<sup>[7]</sup>。此后,随着 RS 和 GIS 技术的兴起,对传统的土地利用/覆盖变化与土壤侵蚀研究方法产生了巨大的变革。目视解译作为传统的遥感信息获取和解读方式,能最直接地获取土壤侵蚀和土地利用/覆盖的空间数据。据此王思远等在对 TM 影响目视判读的基础上对我国不同土壤侵蚀下的土地利用类型、不同地貌特征下的土壤侵蚀状况、不同土地利用结构下的土壤侵蚀进行了分析,基于 GIS 定量总结了我国不同土地利用背景下的土壤侵蚀空间分布规律<sup>[8]</sup>。类似的方法在其它区域土地利用和土壤侵蚀的关系研究中得到了广泛地应用<sup>[3,9]</sup>。然而,该方法与元素示踪法一样,其缺陷在于无法和侵蚀因子结合,因而不能用于侵蚀动态监测以及预报模型的建立。因此,基于“3S”的土壤侵蚀经验模型、土壤侵蚀遥感信息模型等逐渐受到广泛地关注,模型的应用越来越趋向于信息的遥感获取、非遥感数据的数字处理和 GIS 的时空综合模拟,再加上土地利用/覆盖分类及变化监测的技术体系日趋成熟,使得土壤侵蚀与土地利用/覆盖变化的交叉研究得到了从定性到定量、从静态到动态、从单一描述到综合评价、从单尺度到多尺度的迅速发展。

本文在“3S”技术的支持下采用通用 USLE 模拟皇甫川流域近十几年来土壤侵蚀的动态变化,在此基础上分析流域内不同土地利用条件下土壤侵蚀规律,着重讨论土地利用格局变化对区域土壤侵蚀可能产生的影

响,从而为科学地组织人类有序活动、减轻流域土壤侵蚀提供科学决策依据。

## 1 流域概况

皇甫川流域位于  $E110.3^{\circ} \sim 111.2^{\circ}$ 、 $N39.2^{\circ} \sim 39.9^{\circ}$  之间,地跨鄂尔多斯高原与黄土高原,总面积约为  $3240\text{km}^2$ 。皇甫川流域属温带半干旱大陆性气候,年平均气温  $6.2 \sim 7.2^{\circ}\text{C}$ ;年平均降雨量在  $379 \sim 420\text{mm}$  之间,主要集中在夏季,6~8月份的降雨量占总降水量的61%。流域内砒砂岩大面积裸露,原生植被破坏殆尽,再加上较大的地势高差和较强的暴雨冲刷导致水土流失十分严重,年平均向黄河输送约  $0.5 \times 10^8\text{t}$  泥沙,深刻影响着当地的生态环境和农牧业生产条件。土壤母质类型为砒砂岩土类、黄土类、风沙土类、冲积土类,分别占流域面积的39.8%、41.3%、17.0%、1.9%,土壤类型相应为栗钙土、黄绵土、风沙土、草甸土和潮土,其中大部分属于易侵蚀类型,这也决定了该区的土壤侵蚀比较强烈。

皇甫川流域属于农牧交错带,主要的土地利用类型为耕地、草地和林地,形成了以草地利用为主、耕地镶嵌、小片林地星散分布、侵蚀沟网嵌套的土地利用格局。其中,流域中西部和北部的人口较为稀少又有大面积连片分布的天然草地,适合于开展草地畜牧业;而东南部人口相对稠密,具备了开展农业生产的劳动力资源,加之地形破碎、土地开垦程度高,经济发展以农业为主。耕地主要集中在沙圪堵、纳林与府谷三乡,其中坡耕地占到耕地总面积的46%,但大多数坡耕地土壤含水量差、淋溶作用强、土壤肥力低、平均单产低。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据源

本研究采用的基础数据包括:流域1:5万的数字高程模型(DEM);1960~2000年流域各气象站点观测资料;流域1:10万土壤类型图;流域1:10万土壤质地图和遥感影像等。其中遥感数据是1987年和2000年每年3月25日、7月4日和11月20日的TM影像,空间分辨率为30m。各基础图件经过几何配准和数据重采样后,统一校正到能与TM影像配合套准( $\text{RMS} \leq 0.5$ 像元),即栅格单元大小为  $30\text{m} \times 30\text{m}$ 。

### 2.2 土地利用变化转移矩阵

转移矩阵可以全面而又具体地刻画区域土地利用变化的结构特征与各类用地类型变化的方向,其数学形式为:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nm} \end{pmatrix}$$

式中, $A_{ij}$ 是指 $k$ 时期的 $i$ 种土地利用类型转变为 $k+1$ 时期 $j$ 种土地利用类型的面积。转移矩阵的意义在于它不仅反映研究期初、研究期末的土地利用类型结构,同时还可以反映研究时段内各土地利用类型的转移变化情况,便于了解研究期初各类型土地的流失去向以及研究期末各土地利用类型的来源与构成<sup>[10]</sup>。

### 2.3 土壤侵蚀动态模拟方法

**2.3.1 土壤侵蚀模型** 黄土高原地表破碎且降雨集中,水蚀起着关键的作用,尤其是短时强降雨对地表的片蚀、沟蚀非常严重。另外由于地表破碎,由陡坡崩塌等造成的重力侵蚀也起着极为重要的作用,与水蚀相互复合,也是造成本区强烈沟蚀的重要动力。前人的研究成果表明:水蚀和重力侵蚀约占皇甫川流域土壤侵蚀总量的83%<sup>[11]</sup>。相对而言,皇甫川流域的风蚀等其它侵蚀的作用较弱,所以本文对风蚀等侵蚀部分不做考虑。土壤水蚀计算采用美国的USLE方程。对皇甫川流域五分地沟的实地观测结果表明:当地形坡度小于 $35^{\circ}$ 时,相对于水蚀,重力侵蚀可以忽略不计;只有当地形坡度大于 $35^{\circ}$ 时,重力侵蚀才显著增大,此时重力侵蚀值约为水蚀值的30%<sup>[12]</sup>。因此,皇甫川流域土壤侵蚀模型的表达式为:

$$E = \begin{cases} R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P / 0.83 & \theta \leq 35^{\circ} \\ 1.3 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P / 0.83 & \theta > 35^{\circ} \end{cases}$$

式中, $E$ 为年均土壤侵蚀量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ); $R$ 为降雨侵蚀力因子( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ); $K$ 为土壤可蚀性因子( $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ); $LS$ 为地形因子,其中 $L$ 为坡长因子, $S$ 为坡度因子; $C$ 为地表覆盖因子; $P$ 为水

土保持措施因子。

2.3.2 模型参数计算 模型参数的计算和赋值详见表 1。其中,  $R$  因子是通过建立流域降雨量与降雨侵蚀力的回归模型并结合 Kriging 内插法来获得的<sup>①</sup>; 在  $C$  因子的计算过程中, 考虑到流域的农业生产活动基本上是与自然降水同步的, 植被覆盖状况与自然降水有密切相关, 所以选择各时段的平均 Fournier 指数作为加权平均因子, 在利用针对 TM 遥感影像的亚像元模型<sup>[15]</sup> 计算 3、7、11 月份植被盖度的基础上求算年平均植被盖度。在  $V$  的计算式中<sup>[13]</sup>,  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  分别表示 3、7、11 月份的植被盖度;  $P_i$  和  $P$  分别是月降水量和年降水量;  $O$ 、 $M$ 、 $A$ 、 $J_n$ 、 $J_l$ 、 $S$ 、 $J$  和  $D$  分别代表 10 月、3 月、4 月、6 月、7 月、1 月和 12 月。

表 1 皇甫川流域土壤侵蚀模型参数计算表<sup>[11-14]</sup>

Table 1 Parameters calculation of soil erosion model in Huangfuchuan Watershed<sup>[11-14]</sup>

参数 Parameters	计算方法 Methods for calculation	说明 Illumination
降雨侵蚀力因子 Rainfall wash factor	$R = 2.18P - 51.45$	$P$ —降雨量 Precipitation
土壤可蚀性因子 Soil erodibility factor	$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp[-0.0256S_d(1 - S_j/100)] \right\} \times$ $\left[ \frac{S_j}{C_l + S_i} \right]^{-0.3} \times \left\{ 1.0 - 0.25C_l \right.$ $\left. [C + \exp(3.72 - 2.95C)] \right\} \times$ $\left[ 1.0 - 0.7(1 - S_d/100) \right] \left\{ 1 - \frac{S_d}{100} + \exp \right.$ $\left. [-5.51 + 22.9(1 - S_d/100)] \right\}$	$S_d$ —砂粒含量 Sand content; $S_i$ —粉粒含量 Silt content; $C_l$ —粘粒含量 Clay content; $C$ —有机碳含量 Soil organic carbon content
坡长因子 Slope length factor	$L = \left( \frac{\lambda}{20} \right)^{0.3} = 0.41\lambda^{0.3}$	$\lambda$ —任意坡长小区的水平投影长度 Horizontal projected length of random slope length section
坡度因子 Slope factor	$S_1 = 0.0974\theta^{1.30}$ ; $S_2 = 0.774\theta^{1.45}$ $S_3 = 65.4 \sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065$	$\theta$ —坡度 Slope; $S_1$ —黄土坡地的坡度因子 $S$ of loess slope field; $S_2$ —砒砂岩坡地的坡度因子 $S$ of soft rock slope field; $S_3$ —其他类型坡地的坡度因子 $S$ of other slope fields
地表覆盖因子 Steepness factor	$C_1 = e^{-0.0418(V-5)}$ ; $C_2 = 0.992e^{-0.034V}$ $V = \left[ \left( \sum_{i=O}^M P_{ij}^2 / P \right) \times V_1 + \left( \sum_{i=A}^J P_{ij}^2 / P \right) \times V_2 \right.$ $\left. + \left( \sum_{i=J_l}^S P_{ij}^2 / P \right) \times V_3 \right] \setminus \sum_{i=J}^D P_{ij}^2 / P$	$V$ —年平均植被盖度 Annual mean vegetation coverage; $C_1$ —耕地的地表覆盖因子 $C$ of cropland; $C_2$ —林地、灌丛和草地的地表覆盖因子 $C$ of woodland, shrub and grassland
水土保持措施因子 Soil and water conservation practice factor	草地 Grassland 0.3 灌丛 Shrub 0.3 林地 Woodland 0.2 水体 Water 0 城镇用地 Urbanland 0 裸砒砂岩 Soft rock 1 沙地 Sand 1  耕地 Cropland 0.6 0.5 0.3	坡面水平沟、鱼鳞坑等水保措施 Soil and water conservation practice, such as level-ditch and fish-scale pit  无水保措施 No soil and water conservation practice  非等高耕作 Non-contour plowing > 10° 等高耕地 Contour plowing 5~10° < 5°

2.3.3 模型运算 利用流域降雨、土壤质地、土壤类型及地形图等专题图件, 输入计算机中建立或生成研究所需的专题图层, 然后充分利用 RS、GIS 软件(ERDAS IMAGINE 8.5 和 ArcInfo 8.3) 强大的图层叠加和模型运算等功能, 最终完成模型参数值和土壤侵蚀量的计算。具体的计算流程见图 1。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化

图 2 给出了皇甫川流域 1987 年和 2000 年土地利用的空间格局。由于对 1987 年和 2000 年流域土地利用分类的过程完全一样, 根据数据的获取情况, 仅对 2000 年的分类结果利用野外 GPS 数据进行精度评价, 以代

① 高清竹, 北京师范大学博士学位论文, 2003

表整个土地利用变化监测过程的精度。结果表明,其总精度达到 75.39%, Kappa 系数为 0.68, 能够满足研究要求。从图中可以看出,草地的格局变化最为显著,其在 1987 年的土地利用中占有绝对优势,主要分布在流域的北部和中东部;到 2000 年,由于长期的人类活动(包括草地的开垦、过牧、灌丛化等)以及自然环境恶化的综合影响,西北部的草地部分被灌丛和耕地所取代,东北部的草地大部分转变为灌丛、林地和沙地,而中西部的草地则基本上损失殆尽,主要为灌丛所占据。裸砒砂岩在 1987 年集中分布在流域南部皇甫川两岸,并散布于各级沟道的沟坡;通过十多年流域一、二期重点治理(如大面积发展沙棘等),到 2000 年裸砒砂岩面积大幅度缩减,主要为灌丛、林地和耕地替代,其中陕西境内皇甫川两岸的裸砒砂岩治理效果显著,只有零星分布。耕地面积也快速增长,其空间位置的变化主要是以河道和水域为依托向四周扩张,其中以流域北部的灌丛和草地、南部的裸砒砂岩和灌丛、东南部的灌丛的转化最为明显。林地变化幅度不大,流域中西部的整片林地的面积略有减小,而在东北部地区将有小片林地出现。1987 年在流域北部、沙圪堵附近和东南部有 3 片沙地成片分布,到 2000 年北部和沙圪堵附近的沙地面积骤减,东南部的沙地则大部被治理成草地。灌丛在 1987 年主要分布在流域东南部,在 2000 年已经向中西部和西北部得到了大面积的扩展。另外,城镇用地和水体的面积在原有格局的基础上也稍有增减。

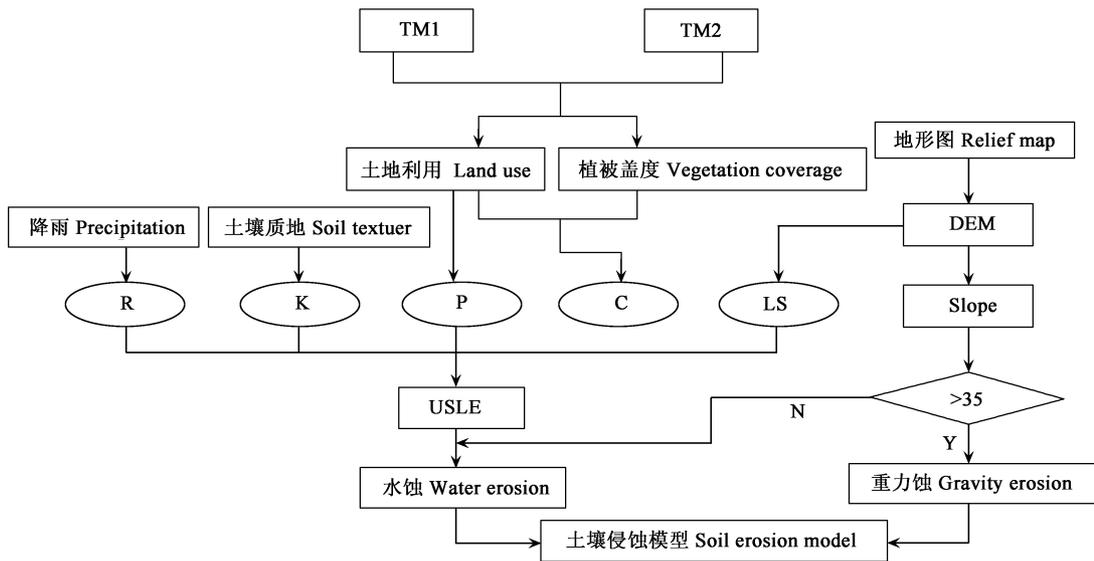


图1 皇甫川流域土壤侵蚀计算流程图

Fig.1 Flow chart of soil erosion computation in Huangfuduan Watershed

从 1987 年到 2000 年,流域土地利用数量发生了显著的变化(表 2 和表 3)。灌丛、耕地、林地和城镇用地比例均有不同程度的增长,分别由 1987 年的 25.88%、5.96%、3.54% 和 0.03% 增加到 2000 年的 34.23%、11.09%、6.80% 和 0.09%。其中,城镇用地面积扩大幅度最为剧烈,相比 1987 年增长了 2 倍多;而灌丛的增加幅度虽然只为 32.27%,但其绝对增加的面积却是最大的,达到了 270.57km<sup>2</sup>。在此期间,由于流域人口增长了 16.3%,直接导致了耕地的猛增,耕地面积增加了 166.33km<sup>2</sup>,到 2000 年占据了流域总面积的 11.09%;与此同时,城市化进程和经济发展也推动了城镇用地的剧烈扩张。草地由 1987 年的 35.60% 减少到 2000 年的 27.08%,缩减幅度虽然只为 23.95%,但由于其面积占绝对优势,因而极大地影响到了流域的生态环境,究其原因则是强烈的人类不合理的土地利用方式大面积地破坏草地,进而使之转化为沙地或者使得砒砂岩裸露。水体由 1987 年的 8.07% 减至 2000 年的 2.87%,缩减幅度为 64.46%,共减少了 168.63km<sup>2</sup>,这种现象对流域的植被恢复以及农业生产等都极为不利,可以预计愈发严重的人-水、畜-水矛盾将成为阻碍当地经济发展、社会安定和生态恢复的瓶颈性因素。

表 2 1987~ 2000 年皇甫川流域土地利用变化情况表

Table 2 Land use changes during 1987~ 2000 in Huangfuchuan Watershed

土地利用类型 Land use type	1987		2000		Δ1987~ 2000 (km <sup>2</sup> )	Δ1987~ 2000 (%)
	面积(km <sup>2</sup> ) Area	比例(%) Proportion	面积(km <sup>2</sup> ) Area	比例(%) Proportion		
林地 Woodland	114.67	3.54	220.17	6.80	105.50	92.00
灌丛 Shrub	838.45	25.88	1109.02	34.23	270.57	32.27
草地 Grassland	1153.46	35.60	877.26	27.08	-276.20	-23.95
耕地 Cropland	192.95	5.96	359.28	11.09	166.33	86.20
沙地 Sand	193.97	5.99	135.02	4.17	-58.95	-30.39
裸砒砂岩 Soft rock	483.97	14.94	443.46	13.69	-40.51	-8.37
城镇用地 Urbanland	0.93	0.03	2.82	0.09	1.89	203.23
水体 Water	261.60	8.07	92.97	2.87	-168.63	-64.46

表 3 1987~ 2000 年皇甫川流域土地利用变化的转移矩阵

Table 3 Matrix of land use changes during 1987~ 2000 in Huangfuchuan Watershed(km<sup>2</sup>)

1987	2000							
	林地 Woodland	灌丛 Shrub	草地 Grassland	耕地 Cropland	沙地 Sand	裸砒砂岩 Soft rock	城镇用地 Urbanland	水体 Water
林地 Woodland	50.1541	30.1773	15.0048	7.5930	1.1582	9.5742	0.0018	1.0050
灌丛 Shrub	62.7938	417.1865	106.1237	151.2924	41.1793	49.5538	1.0339	9.2858
草地 Grassland	44.0880	367.1758	511.5268	56.0697	48.6398	100.9220	0.1298	24.9062
耕地 Cropland	14.1846	81.5158	16.6561	61.5418	3.4711	12.4702	0.1010	3.0078
沙地 Sand	5.2315	41.0459	100.4145	6.7295	36.1524	3.7740	0.2740	0.3497
裸砒砂岩 Soft rock	32.9634	94.3367	79.1849	47.9692	1.5332	219.2302	0.1271	8.6233
城镇用地 Urbanland	0.0000	0.0072	0.0126	0.0009	0.0000	0.0081	0.9050	0.0000
水体 Water	10.7568	77.5778	48.3351	28.0817	2.8861	47.9241	0.2470	45.7924

从土地利用各类型相互转化来看, 城镇用地主要是由水体、灌丛和沙地转变而来, 其中灌丛被占用最多, 而对耕地的占用相对较少, 说明当地重视耕地保护的同时却把城镇用地的需求转移到灌丛和水面等上面; 林地面积增加 105.50km<sup>2</sup>, 灌丛对其贡献最大, 其次是草地和裸砒砂岩, 反映了 20 世纪 80 年代以来小流域综合治理大力发展林果业的成果, 其中草地和灌丛上主要栽种经济林, 裸砒砂岩则以生态林为主; 沙地的治理效果也非常明显, 其中有近 100.42km<sup>2</sup> 的沙地被治理成了草地, 而对裸砒砂岩的治理基本上灌、草措施为主, 同时加强耕作措施的维护。

### 3.2 土壤侵蚀评价

3.2.1 不同土地利用格局下土壤侵蚀变化 图 3 给出了 2000 年流域 USLE 中各侵蚀因子的空间分布, 将各因子代入 USLE 方程连乘, 继而得到基于栅格的流域土壤侵蚀模数图(1987 年土壤侵蚀模拟过程同上)。结果显示, 流域 1987 年和 2000 年的土壤侵蚀模数分别为 16160.72t/km<sup>2</sup> 和 13943.32t/km<sup>2</sup>。在此基础上, 根据水利部颁布的《(SL190-96) 土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[16]</sup> 进行土壤侵蚀强度的划分, 得到流域的土壤侵蚀强度图(图 4), 并统计了不同时期流域各土壤侵蚀等级的面积(表 4)。

从图 4 和表 6 可以看出, 从 1987 年到 2000 年, 微度侵蚀和轻度侵蚀的面积分别由 1066.28km<sup>2</sup> 和 558.90km<sup>2</sup> 增加到了 1546.13km<sup>2</sup> 和 704.70km<sup>2</sup>, 其中微度侵蚀的增长幅度达到 14.81%; 中度侵蚀一直到剧烈侵蚀的面积都呈减少趋势, 其中除剧烈侵蚀外其余侵蚀等级的缩减比例都在 5% 以上; 从空间上看, 流域南部地区极强度侵蚀和剧烈侵蚀的面积显著减少, 显示了当地水土流失综合治理的良好成效。究其原因, 则是由

表 4 1987 年和 2000 年皇甫川流域土壤侵蚀等级面积统计表

Table 4 Proportions of soil erosion classes in 1987 and 2000 in Huangfuchuan Watershed

侵蚀等级 Erosion class	1987		2000	
	面积(km <sup>2</sup> ) Area	比例(%) Proportion	面积(km <sup>2</sup> ) Area	比例(%) Proportion
微度侵蚀 Weak erosion	1066.28	32.91	1546.13	47.72
轻度侵蚀 Slight erosion	558.90	17.25	704.70	21.75
中度侵蚀 Moderate erosion	520.02	16.05	348.95	10.77
强度侵蚀 Intensive erosion	301.00	9.29	98.17	3.03
极强度侵蚀 Very intensive erosion	246.56	7.61	71.60	2.21
剧烈侵蚀 Severe erosion	547.24	16.89	469.80	14.50

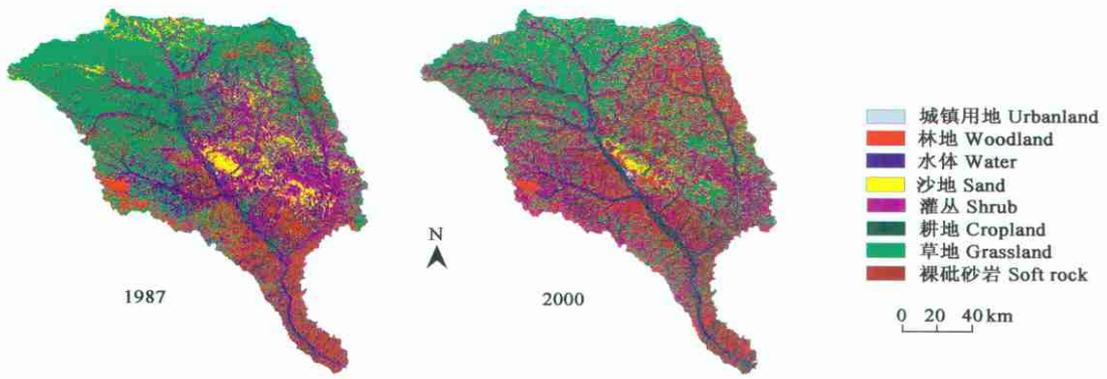


图2 1987和2000年皇甫川流域土地利用格局图  
Fig. 2 Land use patterns of Huangfuchuan Watershed in 1987 and 2000

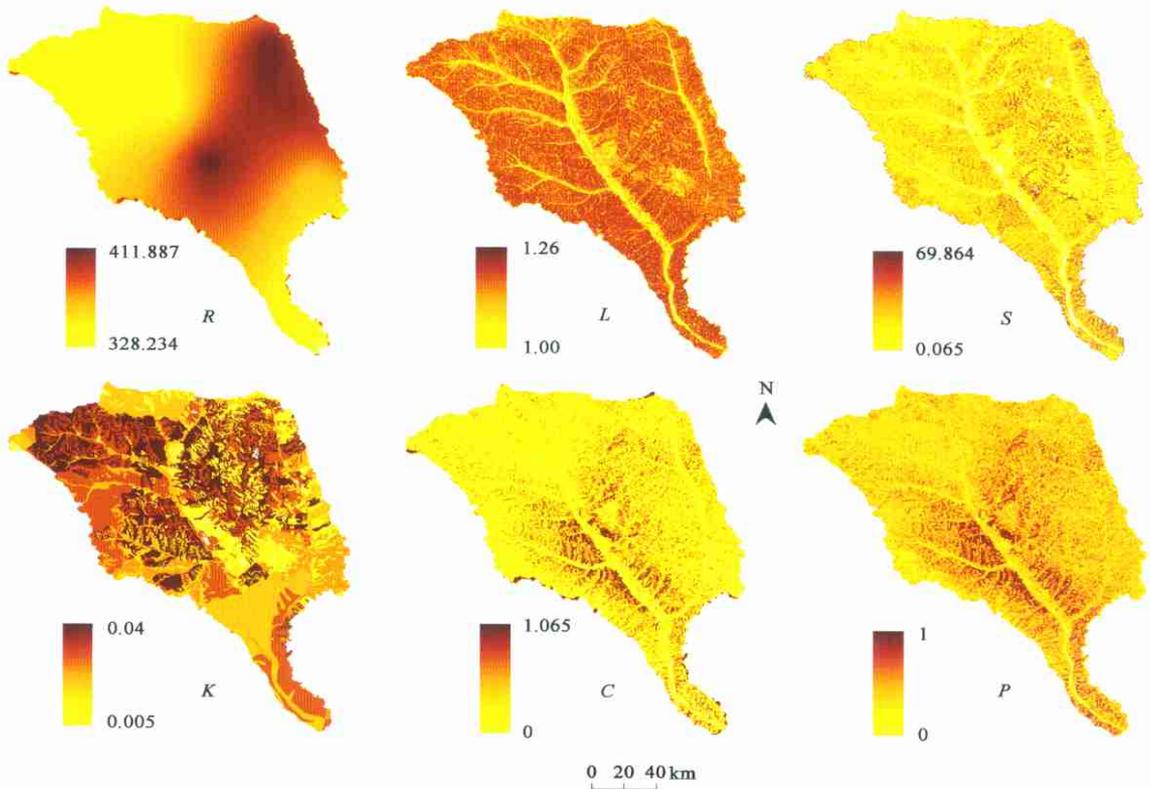


图3 2000年皇甫川流域土壤侵蚀因子图  
Fig. 3 Factors of soil erosion in 2000 in Huangfuchuan Watershed

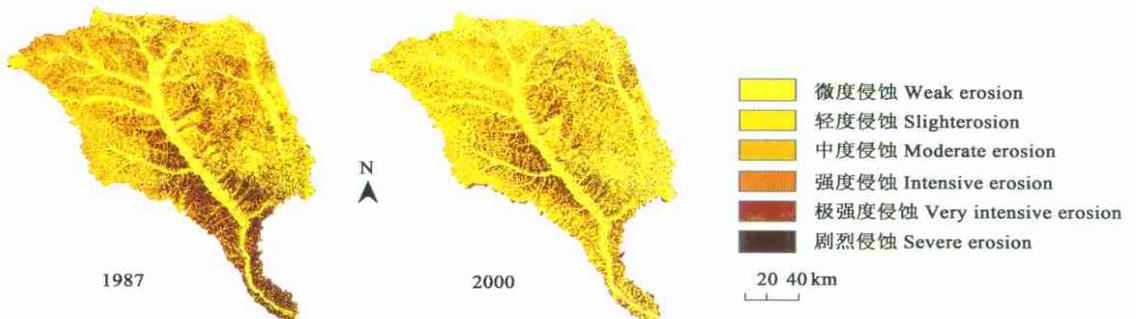


图4 1987和2000年皇甫川流域土壤侵蚀强度图  
Fig. 4 Soil erosion classes in 1987 and 2000 in Huangfuchuan Watershed

于随着皇甫川流域一期及二期一阶段水土流失重点治理的开展,以林地、灌丛措施为主的植被恢复取得了良好的效果,土地利用格局变化剧烈,其中林地、灌丛所占比例大幅度上升而裸砒砂岩和沙地面积减少,同时耕地的开垦和耕作也注重了水土保持措施的加强,使得自上而下系统完善的综合措施防护体系水土保持功能显著,从而使整个流域的年土壤侵蚀模数相比 1987 年减少了近  $2220t/km^2$ 。但是也应看到,2000 年土壤侵蚀模数仍远高于流域的土壤允许侵蚀临界值(即  $3700 \sim 6300t/km^2$ )<sup>[11,12]</sup>,在今后较长的时间内,流域的土壤侵蚀仍将维持在较高的水平上,其对生态安全的威胁不可小视。

**3.2.2 不同土地利用类型的土壤侵蚀变化** 从流域不同土地利用类型的年平均土壤侵蚀模数来看(表 5),2000 年沙地的侵蚀模数比 1987 年增加了近  $3892t/km^2$ ,其余类型则呈现下降趋势,其中裸砒砂岩减少了近  $3500t/km^2$ ,其次为灌丛和林地,分别比 1987 年减少了  $640.99t/km^2$  和  $444.99t/km^2$ ,草地则减少了  $397.96t/km^2$ 。此外,在 6 种不同土地利用类型之间,同一年份内土壤侵蚀模数的大小顺序基本保持为裸砒砂岩> 沙地> 耕地> 草地> 林地> 灌丛,表明林地、灌丛措施是流域植被恢复和减少土壤侵蚀的首选,草地减小土壤侵蚀的效果也比较明显,而沙地尤其是分布面积较广的裸砒砂岩则是土壤侵蚀综合治理的难题和关键。

表 5 1987 年和 2000 年皇甫川流域不同土地利用类型的土壤侵蚀模数

Table 5 Modulus of soil erosion of different land use types in 1987 and 2000 in Huangfuchuan Watershed( $t/km^2$ )

年份 Year	林地 Woodland	灌丛 Shrub	草地 Grassland	耕地 Cropland	沙地 Sand	裸砒砂岩 Soft rock
1987	2441.40	2217.43	3092.54	3125.36	29178.60	81677.53
2000	1996.41	1576.44	2694.58	2874.86	33070.08	78179.74

表 6 给出了 1987 年和 2000 年流域各土地利用类型中各侵蚀等级面积分布的统计情况。从中可以看出,对于林地、灌丛、草地和耕地 4 种类型,从面积分配上看主要处于微度侵蚀到中度侵蚀的水平;而沙地和裸砒砂岩则相反,其大部分均处于极强度侵蚀和剧烈侵蚀的状况,是控制流域整体土壤侵蚀状况的关键类型。从变化趋势上看,林地、灌丛、草地和耕地在此 3a 间对应的微度侵蚀面积均呈明显的增长趋势,灌丛增加最大,其次为草地和耕地,林地最小,其中灌丛 2000 年的微度侵蚀面积比 1987 年增加了  $272.73km^2$ ,占据了流域总面积的近三分之一;林地、灌丛和草地的轻度侵蚀面积的变化趋势是先增大、后减小,而耕地与此相反;对于中度侵蚀到剧烈侵蚀面积的变化,除林地的剧烈侵蚀面积在 2000 年稍有反弹外,林地、灌丛、草地和耕地都基本上保持逐年减少的态势,由于这 4 种土地利用类型在上述 4 种侵蚀等级上所占的面积比例不大,因而对土壤侵蚀的影响并不明显。此外,沙地和裸砒砂岩在中度侵蚀一直到剧烈侵蚀上的面积都保持递减趋势,其中剧烈侵蚀面积分别从 1987 年的  $92.60km^2$  和  $414.68km^2$  减少到 2000 年的  $69.62km^2$  和  $382.38km^2$ 。上述分析结果表明,随着侵蚀强度的增加,林地、灌丛、草地和耕地的侵蚀面积在逐渐减少,而沙地和裸砒砂岩的侵蚀面积在逐渐增加,说明长期以来皇甫川流域按当地土壤侵蚀特点进行分类区的综合水保防治取得了良好的成效。

表 6 1987 年和 2000 年皇甫川流域不同土地利用类型下各侵蚀等级的面积分布表

Table 6 Areal distribution of soil erosion classes of different land use types in 1987 and 2000 in Huangfuchuan Watershed ( $km^2$ )

侵蚀等级 Erosion classes	林地 Woodland		灌丛 Shrub		草地 Grassland		耕地 Cropland		沙地 Sand		裸砒砂岩 Soft rock	
	1987	2000	1987	2000	1987	2000	1987	2000	1987	2000	1987	2000
微度侵蚀 Weak erosion	34.40	133.83	380.34	653.07	275.49	378.78	90.05	268.30	14.61	9.01	8.72	7.38
轻度侵蚀 Slight erosion	35.61	60.50	211.95	310.39	251.90	252.83	33.71	61.80	17.56	11.78	8.12	7.56
中度侵蚀 Moderate erosion	31.24	19.05	148.30	113.16	278.47	172.23	29.18	20.67	21.50	13.90	11.48	10.11
强度侵蚀 Intensive erosion	9.97	3.31	61.58	18.95	183.80	51.01	17.43	4.29	18.01	11.44	10.28	9.25
极强度侵蚀 Very intensive erosion	2.74	2.08	30.78	6.56	137.46	15.63	15.25	1.42	29.70	19.28	30.70	26.78
剧烈侵蚀 Severe erosion	0.70	1.40	5.50	6.89	26.34	6.78	7.33	2.79	92.60	69.62	414.68	382.38

**3.2.3 土壤侵蚀“3S”模拟的精度评价** 由于研究区水文数据的限制,选取皇甫川流域的子流域——长川流域(流域面积为  $523.77 km^2$ )来检验基于“3S”技术的土壤侵蚀模拟的精度。在长滩水文站(位于流域出口)1987 年汛期逐日平均悬移质输沙率数据(表 7)的基础上,统计得到长川流域当年的年输沙量为  $2.81 \times 106t$ ,又

根据黄土高原地区土壤侵蚀的特点(即坡面土壤侵蚀产沙的输移比约为1),可计算出长川流域1987年土壤侵蚀模数的实测值为 $5364.95t/km^2$ ;而长川流域1987年土壤侵蚀模数的模拟值则通过利用该流域边界对皇甫川流域土壤侵蚀模数图进行切割来获取,其值为 $6923.01t/km^2$ 。比较1987年长川流域土壤侵蚀的实测值和模拟值可以看出,本文采用的土壤侵蚀“3S”模拟方法的精度达到了70.96%。

表7 长川流域长滩水文站1987年汛期逐日平均悬移质输沙率( $kg/s$ )

Table 7 Daily average suspended sediment transport rate during the flood season in 1987 in Changtan Hydrological Station of Changchuan Watershed

(kg/s)														
日	月 Month				日	月 Month				日	月 Month			
Day	6	7	8	9	Day	6	7	8	9	Day	6	7	8	9
1	0	1950	0	0	12	0	1.56	628	0	22	2.37	0.018	0	0
2	0	96.0	188	0	13	0	0.14	6360	0	23	2.12	0	379	0
3	0	22.1	36.6	52.5	14	25.0	1220	40.2	0	24	0.16	0	866	0
4	139	24.5	0.50	10.1	15	7580	166	169	0	25	0.27	0	4.86	0
5	1170	2.40	0.13	0.46	16	4610	1.93	23.3	0	26	0.30	0	19.0	0
6	2.05	0.072	0.26	0.39	17	3470	0	1.11	0	27	0.042	0	2.91	0
7	0.40	0.014	0.14	0.082	18	88.8	0	2.61	0	28	0.013	0	0.12	0
8	0.11	0	0.021	0.017	19	1.61	511	1.81	0	29	0	0	0.04	0
9	0.12	26.1	0	0	20	0.15	102	0.24	0	30	0	0	0.003	0
10	0	270	0	0	21	0.10	0.98	0	0	31	0	0	0	0
11	0	244	0	0										

#### 4 结论

(1) 土地利用变化是导致流域土壤侵蚀变化,乃至影响区域生态安全的重要因素,通过对模拟和预测的土地利用变化进行定量的土壤侵蚀评价,可以为土地资源利用和管理、水土保持综合治理提供决策依据。本文在“3S”技术的支持下,揭示了皇甫川流域近十多年来土地利用格局的变化,同时又采用通用土壤侵蚀模型对不同土地利用格局下的土壤侵蚀变化进行了定量评价(1987年流域土壤侵蚀模拟精度达到70.96%),完善了土地利用变化的土壤侵蚀评价技术体系,具有广阔的应用前景。

(2) 从1987年到2000年,皇甫川流域土地利用变化的总体态势是:城镇用地、林地、耕地和灌丛的面积逐渐增加,其增加速率依次减小;水体、草地、沙地和裸砒砂岩面积逐渐减小,其中水体缩减的幅度最大。表明近十几年来,流域土地利用格局持续承受着来自当地快速城市化进程及社会经济发展和生态环境保护及建设两方面、相互矛盾的巨大压力,水体大幅度缩减则是制约两者的瓶颈性因素。

(3) 在皇甫川流域6种不同土地利用类型之间,同一年份内土壤侵蚀模数的大小顺序基本保持为裸砒砂岩>沙地>耕地>草地>林地>灌丛,表明林地、灌丛措施是皇甫川流域植被恢复和减少土壤侵蚀的首选措施,草地限制土壤侵蚀的效果也比较明显,而沙地尤其是分布面积较广的裸砒砂岩则是土壤侵蚀综合治理的难题和关键。

(4) 流域土壤侵蚀与土地利用格局有密切的联系:从1987年到2000年,随着土地利用格局中林地和灌丛面积的增加、裸砒砂岩和沙地面积的逐步减少,流域年土壤侵蚀模数从 $16160.72t/km^2$ 减少到 $13943.32t/km^2$ ,水土流式综合治理效果显著。但由于裸砒砂岩和沙地的面积仍在整个流域占有相当的比例以及耕地剧增等因素,此模数仍明显高于流域土壤允许侵蚀的临界值,生态环境仍然处于不安全状态。因此,为确保生态安全,必须对未来土地利用格局进行优化。

#### 5 讨论

(1) 在土壤侵蚀的模拟过程中,由于缺乏相关数据和野外实验的支持,某些参数的选取采用了前人在黄土高原其它地区的研究成果,虽然其对最终的模拟结果不会产生大的偏差,但精度仍有待提高。

(2) 皇甫川流域年土壤侵蚀模数虽然逐渐下降,但仍明显高于流域土壤允许侵蚀的临界值,因而有必要继续进行土地利用优化格局研究或生态安全条件下的土地利用格局研究,以实现流域社会、经济和生态的可持续发展。从减少土壤侵蚀的角度考虑,流域土地利用格局调整方向的应为大力增加灌丛和林地比例并减少裸砒砂岩和沙地的面积,保持和扩大水体面积,并针对不同土地利用类型的土壤侵蚀状况在空间上对林、灌、草

进行合理配置。此外,应积极推行和落实国家的“退耕还林、退耕还草”政策,大力增加林、灌比例,适当增加草地面积并对其进行人工改良,同时在大力发展基本农田的前提下缩减耕地、加强耕地的水保措施及提高单产,以确保流域的生态安全。

#### References:

- [ 1 ] Shi P J, Gong P, Li X B, *et al.* Methodology and application of study on land use cover change. Beijing: Science Press, 2000. 1~ 3.
- [ 2 ] Shi P J, Song C Q, Jing G F. Strengthening the study of land use cover change and its impact on eco-environmental security. *Advance in Earth Science*, 2002, 17( 2): 161~ 168.
- [ 3 ] Liu Q, Wang Z J. Study on changes of soil erosion under different land use patterns in Liao River Basin based on GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18( 4): 105~ 107.
- [ 4 ] Ruan F S. A preliminary study on the characteristics of soil and water losses on various sloping land in granite area. *Geographical Research*, 1995, 14( 2): 64~ 72.
- [ 5 ] Wang B X, Zhang J C, Xu L, *et al.* Study on the function of soil and water conservation for different land use in Hilly Region of South Jiangsu. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4( 1): 145~ 154.
- [ 6 ] Fu B J, Qiu Y, Wang J, *et al.* Effect simulation of land use change on the runoff and erosion for a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57( 6): 717~ 722.
- [ 7 ] Yang W D, Wang Z Q, Sui G P, *et al.* Temporal and spatial distribution of soil erosion on red soil field under different land use patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9( 2): 155~ 158.
- [ 8 ] Wang S Y, Liu J Y, Zhang Z X, *et al.* Study on spatial-temporal feature of land use and land cover under different background of soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15( 3): 48~ 51.
- [ 9 ] Chen S L. Study on the relationship between soil erosion and land use based on GIS. *Journal of Fujian Teachers University(Natural Science)*, 2000, 16( 1): 106~ 109.
- [ 10 ] Zhu H Y, Li X B. Discussion on the index method of regional land use change. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58( 6): 643~ 650.
- [ 11 ] Shi P J, Liu B Y, Zhang K L, *et al.* Soil erosion process and model studies. *Resources Science*, 1999, 21( 5): 9~ 18.
- [ 12 ] Jin Z P, Shi P J, Hou F C. Systemic model and harnessing pattern of soil erosion in Huangfuchuan Watershed in the Yellow River of China. Beijing: Ocean Press, 1992.
- [ 13 ] You S C, Li W Q. Estimation of soil erosion supported by GIS — A case study in Guanji township, Taihe, Jiangxi. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14( 1): 62~ 68.
- [ 14 ] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC — A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38( 6): 381~ 383.
- [ 15 ] Chen J, Chen Y H, He C Y, *et al.* Sub-pixel model for vegetation fraction estimation based on land cover classification. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5( 6): 416~ 422.
- [ 16 ] Ministry of Water Resources P. R. China. Industry standard of P. R. China, Classification standard of soil erosion SL190-96. Beijing: China Water Power Press, 1997, 2~ 16.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践. 北京: 科学出版社, 2000. 1~ 3.
- [ 2 ] 史培军, 宋长青, 景贵飞. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生态环境安全影响的研究. *地球科学进展*, 2002, 17( 2): 161~ 168.
- [ 3 ] 刘权, 王忠静. GIS支持下辽河中下游流域不同土地利用的土壤侵蚀变化分析. *水土保持学报*, 2004, 18( 4): 105~ 107.
- [ 4 ] 阮伏水. 花岗岩不同土地利用类型坡地水土流失特征. *地理研究*, 1995, 14( 2): 64~ 72.
- [ 5 ] 王本贤, 张金池, 徐亮, 等. 苏南丘陵区不同土地利用状况的蓄水保土功能研究. *水土保持研究*, 1997, 4( 1): 145~ 154.
- [ 6 ] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. *地理学报*, 2002, 57( 6): 717~ 722.
- [ 7 ] 杨武德, 王兆骞, 睦国平, 等. 红壤坡地不同土地利用方式土壤侵蚀的时空分布规律研究. *应用生态学报*, 1998, 9( 2): 155~ 158.
- [ 8 ] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 等. 不同土地利用背景下土壤侵蚀空间分布规律研究. *水土保持学报*, 2001, 15( 3): 48~ 51.
- [ 9 ] 陈松林. 基于GIS的土壤侵蚀与土地利用关系研究. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 16( 1): 106~ 109.
- [ 10 ] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. *地理学报*, 2003, 58( 6): 643~ 650.
- [ 11 ] 史培军, 刘宝元, 张科利, 等. 土壤侵蚀过程与模型研究. *资源科学*, 1999, 21( 5): 9~ 18.
- [ 12 ] 金争平, 史培军, 候福昌, 等. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [ 13 ] 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. *自然资源学报*, 1999, 14( 1): 62~ 68.
- [ 15 ] 陈晋, 陈云浩, 何春阳, 等. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用. *遥感学报*, 2001, 5( 6): 416~ 422.
- [ 16 ] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国行业标准. 土壤侵蚀分类分级标准SL190-96. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 2~ 16.