

基于 RS/GIS 和 RUSLE 的华北平原土壤侵蚀现状分析

徐艳杰, 姚志宏, 赵东保

(华北水利水电学院 资源与环境学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 对华北平原的土壤侵蚀状况进行分析, 可为粮食主产区的生态保护及土壤侵蚀防治提供重要依据。在 GIS 技术支持下, 利用遥感影像解译资料、数字高程模型 (DEM) 及土壤、降雨等数据, 对修正土壤流失方程 (RUSLE) 中的各因子进行了量化, 实现了对华北平原土壤侵蚀量的估算, 并对结果进行土壤侵蚀强度分级。分析结果表明, 华北平原多年平均土壤侵蚀模数为 $2\ 674.26\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 最大值可达 $8\ 302.11\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 总体上属中度侵蚀。发生轻度以下侵蚀面积占总面积的 82.94% , 表明华北平原的水土流失在总体上得到了较好的控制。但仍有占总面积 7.33% 的区域属于较强以上的侵蚀等级, 说明局部水土流失严重, 尤以沿太行山、燕山、泰山和大别山的低山丘陵地带的土石山区最为严重, 是华北平原土壤侵蚀治理的重点地区。

关键词: RS/GIS; 土壤侵蚀; RUSLE; 华北平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0217-04

中图分类号: S157.1

Estimating Soil Erosion in North China Plain Based on RS/GIS and RUSLE

XU Yan-jie, YAO Zhi-hong, ZHAO Dong-bao

(School of Resource and Environment, North China University of
Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450011, China)

Abstract: Estimation of soil erosion is of great importance for ecological protection and erosion control in the major grain producing areas of the North China Plain. Based on geographic information system (GIS), the revised universal soil loss equation (RUSLE) was employed to assess quantitatively soil erosion in the North China Plain by incorporating the interpreted data from remote sensing images, digital elevation model (DEM), soil map and rainfall data. Furthermore, the spatial distribution of the soil erosion intensity has been obtained. The results indicated that the annual average soil erosion modulus was $2\ 674.26\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ with the maximum of $8\ 302.11\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, which can be classified as overall moderate according to the national standard. The areas which under the mild range accounted for 82.94% of the study areas, suggesting that the soil loss was under control. Approximately 7.33% of total area was still on the severe range, especially in the rocky mountainous areas along the Taihang Mountains, Yanshan Mountains, Tai Mountains, and Dabie Mountains, the key areas where soil erosion are yet to be controlled.

Keywords: RS/GIS; soil erosion; RUSLE; North China Plain

土壤侵蚀不仅使土地生产力下降、水土资源流失, 而且造成河湖库塘的泥沙淤积, 加剧洪涝、干旱等灾害发生, 成为危及人类生存与发展的重要环境问题之一^[1]。华北平原作为我国粮食主产区, 也是人类扰动最频繁的地区之一, 定量评估区域土壤侵蚀量及强度等级, 分析土壤侵蚀的空间分布特征, 对于决策部门因地制宜地采取相关对策措施减少土壤侵蚀, 保证我国粮食安全具有重要的战略意义。随着地理信息系统 (GIS) 与遥感 (RS) 技术的发展和应用的不断扩

展, 基于 RS 和 GIS 的土壤侵蚀量估算方法不仅能突破传统调查方法在多源信息的“整体分析”上存在的技术瓶颈, 而且能快速、准确地获取大面积的土壤流失和土地退化方面的深加工信息^[2]。目前, 借助 RS/GIS 强大的空间数据挖掘能力, 结合广泛应用的水蚀预报经验模型 RUSLE, 已成为定量评估土壤侵蚀的一条捷径, 在世界许多国家得到广泛的应用和研究^[1-3]。本研究以华北平原为研究区, 以修正通用土壤流失方程 RUSLE 为计算模型, 运用 RS/GIS 技术

收稿日期: 2012-11-07

修回日期: 2012-02-09

资助项目: 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放基金“黄土丘陵区小流域泥沙沉积的地形因子研究”(201203); 国家自然科学基金项目 (41101373)

作者简介: 徐艳杰 (1980—), 女 (汉族), 河南省商丘市人, 硕士, 讲师, 主要从事 3S 技术理论及应用研究。E-mail: xuyanjie@newu.edu.cn.

获取模型所需的各个参数,并实现对研究区的土壤侵蚀量的初步分析和研究,为粮食主产区的土壤侵蚀防治和水土资源利用提供有益参考。

1 研究区概况

华北平原处于北纬 32° — $40^{\circ}24'$,东经 $112^{\circ}48'$ — $122^{\circ}45'$,是中国第二大平原。地处黄河下游。西起太行山脉和豫西山,东至黄海、渤海和山东丘陵,北起燕山山脉,西南到大别山和桐柏山,东南至江苏、安徽北部,与长江中下游平原相连,包括河北、河南、安徽、江苏、山东、北京及天津等 5 省 2 市的大部或部分地区。面积约 $3.30 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。华北平原地势低平,大部分地区海拔在 50 m 以下,地面坡降很小。气候属于暖温带半干旱半湿润季风型气候,季节差异明显,气温温差大。华北平原雨季和干季非常明显,降水量时空分布不均,全年降雨量 500~1 000 mm,6—9 月集中了全年降雨量的 80% 左右,旱涝灾害频繁。

2 研究方法

2.1 模型选择与技术路线

目前,土壤侵蚀的定量测算主要有野外实地观测法、遥感解译法和模拟模型法^[3]。其中,后者在土壤

侵蚀研究中应用最为普遍,尤以美国政府和土壤侵蚀学家提出的修正通用土壤侵蚀方程(RUSLE)为代表的因子分析模型,因其形式简单、因子意义明确、使用方便,是目前应用最广泛的土壤侵蚀模型^[3-4],该模型全面考虑了影响土壤侵蚀的自然因素,并通过降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、植被覆盖与水土保持措施等 5 个因子进行定量计算。其表达式为:

$$A = K \cdot R \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: A ——年均土壤侵蚀量 ($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$);
 K ——土壤可蚀性因子 ($\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$);
 R ——降雨侵蚀因子 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$);
 L ——坡长因子;
 S ——坡度因子;
 C ——植被覆盖与管理因子;
 P ——水土保持措施因子(其中 L, S, C, P 为无量纲因子)。应用 RS/GIS 和 RUSLE 技术估算土壤侵蚀量的关键是各参数值的确定和各因子图的生成^[2]。运用 Erdas Imagine 软件对研究区的遥感影像预处理并进行非监督分类,结合数字高程模型(DEM),第二次土壤调查数据,土壤类型分布图和研究区及其周边地区的 66 个气象站点的日降雨数据资料,在 ArcGIS 软件平台上获取 RUSLE 模型中所需的因子,并进行相关的数据处理和叠加分析,最终获得研究区的土壤侵蚀等级的空间分布图及土壤侵蚀量,其技术路线如图 1 所示。

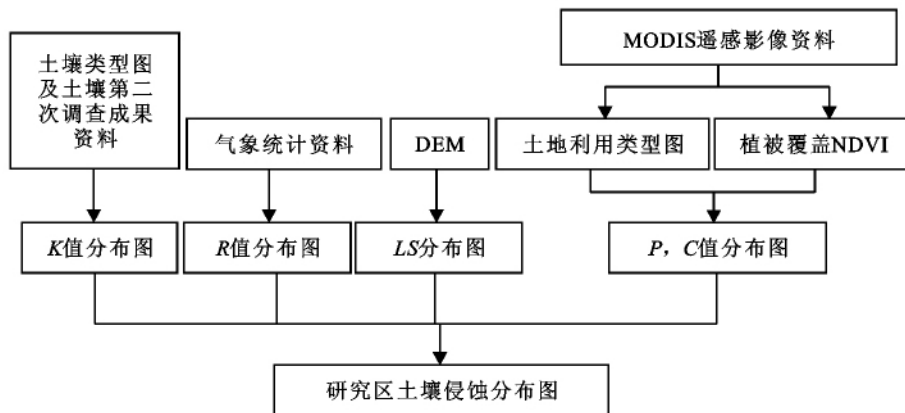


图 1 土壤侵蚀量评估技术路线

2.2 RUSLE 各因子值的确定

2.2.1 土壤可蚀性因子(K)估算 土壤可蚀性是评价土壤对侵蚀敏感程度的重要指标,体现了土壤抵抗由降雨、径流产生的侵蚀能力。在 RUSLE 中将土壤

可蚀性因子定义为标准小区上单位降雨侵蚀力引起的土壤流失率^[1]。直接测定 K 值较难实现,Williams 等^[5]在 EPIC 模型中提出利用土壤有机碳和土壤颗粒组成资料估算 K 值,使其计算更简便,公式为:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[1 - 0.025 \cdot 6S_a(1 - S_i/100)]\} \left(\frac{S_i}{C_i + S_i}\right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)}\right] \quad (2)$$

式中: $S_n = 1 - S_a/100$; S_a ——砂粒含量(%); S_i ——粉粒含量(%); C_i ——黏粒含量(%); C ——有机碳含量(%).

本研究以第二次土壤普查成果数据为基础数据源,参考土壤类型分布图,在 ArcGIS 环境下,经矢量化和坐标校正后,按 90 m×90 m 的网格大小进行栅格化,然后利用 Raster Conulate 工具计算出 K 值,得到研究区的 K 值分布图(附图 1)。

2.2.2 降雨侵蚀力因子(R) 降雨侵蚀力指由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,经典算法是采用降雨动能与最大 30 min 雨强的乘积度量降雨侵蚀力,须以次降雨资料为基础^[6-7]。

考虑长时间序列的降雨过程资料难以获得且计算繁琐,很多学者^[3]尝试采用气象站整编的年均雨量、月均雨量或逐年日雨量等不同类型的降雨资料计算降雨侵蚀力。基于研究区雨量资料的可得性,本研究采用华北平原及其周边 66 个气象站点的 1961—2000 年 40 a 的日降雨量数据计算降雨侵蚀力,采用章文波等^[8-9]提出的用日降雨量资料计算降雨侵蚀力的模型。

$$R_i = a \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \quad (3)$$

$$\begin{cases} \beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{D12}} + \frac{24.455}{P_{Y12}} \\ \alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_i ——第 i 个半月时段内的降雨侵蚀力 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); k ——半月时段内的天数 (d); P_j ——半月时段内的第 j 天的日降雨量 (mm , 要求日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$, 否则以 0 计算); P_{D12} ——日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日均降雨量 (mm); P_{Y12} ——日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年平均降雨量 (mm)。

利用公式(3)–(4)计算各站逐年各半月的降雨侵蚀力,经汇总统计得到各站点多年平均降雨侵蚀力。借助 ArcGIS 工具将各点标于研究区域图中,并赋予各点相应的 R 值,然后利用空间插值功能将点数据表面化,得到研究区的年均降雨侵蚀力分布图(附图 2)。在插值方法的选择上,参考前人的研究成果和经验认为^[10-11],采用析金克里格插值方法能较好地拟合研究区的年均降雨侵蚀力。

2.2.3 地形因子(LS) 地形因子包括坡长因子 L 和坡度因子 S ,二者是降雨侵蚀动力的加速因子,反映了地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。坡度因子 S 是在其它条件相同的情况下,特定坡度的坡地土壤流失量与坡度为 9%或 5%(即标准径流小区的坡度)的坡地土壤流失量之比^[3]。Nearing^[12]通过综合前人多种 S 因子算法提出了计算坡度因子的连续公式。

$$S = -1.5 + 17 / (1 + e^{2.3 - 6.1 \sin \theta}) \quad (5)$$

式中: θ ——坡度($^\circ$)。

坡长因子 L 指在其它条件相同情况下,特定坡

长的坡地土壤流失量与标准径流小区坡长的坡地土壤流失量之比^[3]。本研究采用 Desmet 等^[13]提出的在 GIS 中计算坡长的方法,DEM 的每一个栅格代表坡面的一个坡段,以单位等高线的上坡集水面积 (upslope contribution area) 取代 RUSLE 中定义的坡长,则坡长因子 L 的计算公式为:

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - A_{i,j}^{m+1}}{x_{(i,j)}^m \times D^{m+2} \times 22.13^m} \quad (6)$$

$$x_{(i,j)} = |\sin \alpha_{(i,j)}| + |\cos \alpha_{(i,j)}| \quad (7)$$

式中: $L_{(i,j)}$ ——坐标为 (i,j) 栅格单元的坡长因子,无量纲; $A_{(i,j)}$ ——坐标为 (i,j) 栅格单元上坡集水面积 (m^2); D ——栅格单元边长 (m); $x_{(i,j)}$ ——等高线经过的栅格单元的长度 (m); $\alpha_{(i,j)}$ ——坐标为 (i,j) 栅格单元的坡向; m ——坡长指数 (当 $\theta \leq 0.5^\circ$, $m = 0.2$; 当 $0.5^\circ < \theta \leq 1.5^\circ$, $m = 0.3$; 当 $1.5^\circ < \theta \leq 2.5^\circ$, $m = 0.4$; 当 $\theta > 2.5^\circ$, $m = 0.5$)。

在研究区的 DEM 数据基础上,借助 ArcGIS 10.0 工具,利用上述公式计算各因子值,得到坡长 (L)、坡度 (S) 因子分布图(附图 3—4)。

2.2.4 植被覆盖 (C) 因子与水土保持措施 (P) 因子

植被覆盖因子 (C) 指在相同的土壤、坡度和降雨条件下,某一特定作物或植被状况下的土壤流失量与耕种过后连续休闲土地上相应的土壤流失量之比^[3]。其反映的是与覆盖和管理因子有关的变量对土壤侵蚀的综合作用。水土保持措施 P 因子指采用特定的水土保持措施下的土壤侵蚀量与顺坡种植时的土壤流失量之比^[1]。二者均为侵蚀动力的抑制因子。由定义可知,二者的取值范围均为 $[0, 1]$,其值越大,表示植被覆盖与水土保持措施对土壤侵蚀的抑制作用愈小,发生侵蚀愈强烈。

要确定 C 因子的值,需要详细的气候、土地利用、前期作物残留量、土壤湿度等资料,在大尺度研究中,一般难以获取这些资料,且 C 值的经典算法非常复杂,国内部分学者采用植被覆盖度求解 C 值,并已取得一定成果。本研究拟采用国内学者蔡崇法^[14-15]提出的计算公式:

$$\text{NDVI} = (\text{RED} - \text{NIR}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (8)$$

$$\begin{cases} C = 1 & (\text{NDVI} = 0) \\ C = 0.6508 - 0.3436 \lg \text{NDVI} & (0 < \text{NDVI} < 0.7837) \\ C = 0 & (\text{NDVI} > 0.7837) \end{cases} \quad (9)$$

式中: NIR ——红外波段; RED ——近红外波段。

本研究利用研究区的 MODIS 遥感影像,首先借助 Erdas Imagine 软件依据公式(8)计算获取研究区的植被指数,然后根据公式(9)计算 C 值,得到 C 值分布图(附图 5)。而 P 值的计算则依据美国农业部手册 703 号,根据对研究区的遥感影像进行解译分析

得到的土地利用现状,参考相关学者的研究成果^[1-4,11,14],确定研究区不同土地利用类型的 P 值

(表 1),通过表的赋值与连接根据土地利用图衍生 P 值图(附图 6)。

表 1 华北平原不同土地利用类型的 P 值

土地利用类型	水田	水浇地	旱地	园地	草地	林地	荒草地	水域	建设用地	裸地
P 值	0.35	0.47	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0	0	0	1.0

3 结论

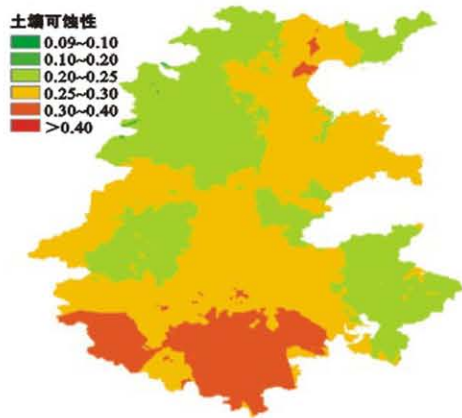
在 ArcGIS 10.0 中,将各因子图层叠加相乘,得到研究区土壤侵蚀空间分布图(附图 7),根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)》对研究区的土壤侵蚀强度划分等级,将同一侵蚀强度的像元归并,获得研究区土壤侵蚀强度等级分布图(附图 7)。结果显示,华北平原多年平均土壤侵蚀模数为 $2\ 674.26\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,最大值可达 $8\ 302.11\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,属中度侵蚀。这与研究区的实际调查结果较为吻合,说明基于 RS/GIS 和 RUSLE 模型评估华北平原大区域土壤侵蚀的方法有效、可行。从不同侵蚀强度的分布来看,黄淮平原和海河平原以及植被较好的山地为微度侵蚀或无明显侵蚀区域,轻度侵蚀发生在冀鲁滨海冲击平原区,西部太行山洪积、冲积平原地区及山前台地属中度侵蚀,西部太行山、燕山、伏牛山等山区及环渤海土石丘陵和低山地区为较强强度侵蚀或强度侵蚀。总体上,占总面积 81.34% 的范围内发生轻度以下的侵蚀,说明华北平原的水土流失在总体上得到了较好的控制,侵蚀强度较低。但仍有占总面积 7.33% 的范围属于强烈以上的侵蚀等级,表明局部水土流失严重,尤以沿太行山、燕山、泰山、大别山山区,特别是低山丘陵地带的土石山区最为严重,有待加强治理。土壤流失在山区发生面积大,强度高,已成为华北平原主要的土地生态问题,是制约华北平原农业可持续发展的重要因素。

[参 考 文 献]

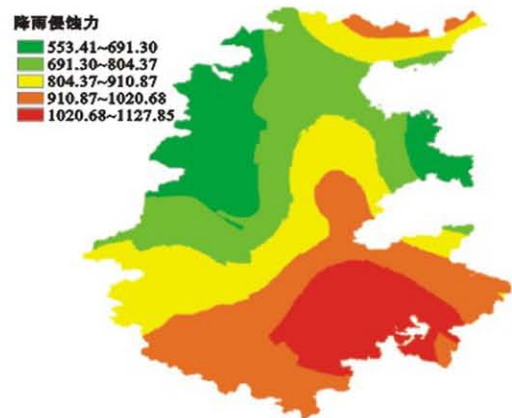
- [1] 秦伟,朱清科,张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 157-163.
- [2] 曾慧娟,潘文斌. 基于 RS/GIS 和 RUSLE 的福建武步溪流域土壤侵蚀研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(5): 88-92.
- [3] 彭建,李丹丹,张玉清. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山

区土壤侵蚀空间特征分析:以云南省丽江市为例[J]. 山地学报, 2007, 25(5): 548-556.

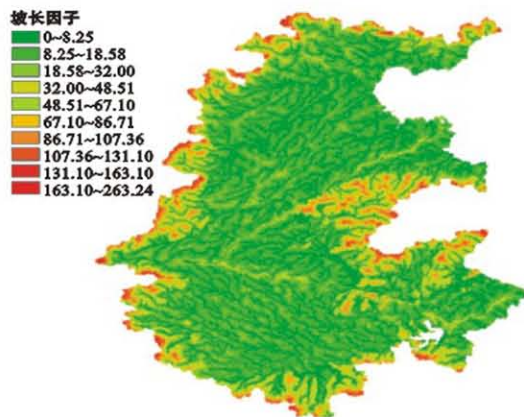
- [4] 扬子胜. 云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J]. 山地学报, 2002, 20(S): 1-9.
- [5] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(5): 381-383.
- [6] 穆兴民,戴海伦,高鹏,等. 陕北黄土高原降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 37-43.
- [7] 刘平,吴志峰,匡耀球,等. 基于日降雨数据的广东省降雨侵蚀力初步分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(5): 555-560.
- [8] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [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] 门明新,字振荣,许噪. 基于地统计学的河北省降雨侵蚀力空间格局研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2270-2277.
- [11] 门明新,陈建,字振荣,等. 基于 SOTER 数据库的河北省土壤侵蚀研究[J]. 中国土壤学通报, 2007, 24(7): 587-592.
- [12] Nearing M A. A single continuous function for slope steepness influence on soil loss[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 67(3): 917-919.
- [13] Desmet P J J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 427-433.
- [14] 王晓峰,常俊杰,余正军,等. 基于 RUSLE 的土壤侵蚀量研究:以南水北调中线陕西水源区为例[J]. 西北大学学报:自然科学版, 2010, 40(3): 545-549.
- [15] 蔡崇法,丁树文,史志华,等. 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): 19-23.



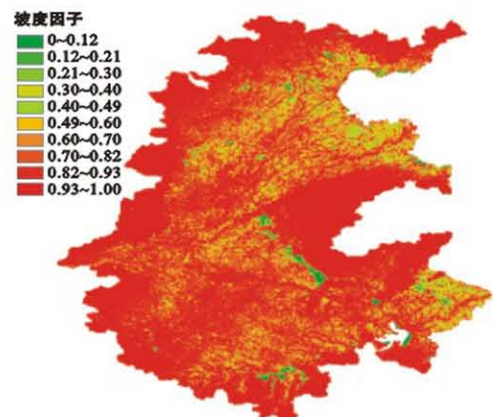
附图1 华北平原土壤可蚀性因子(K值)分布



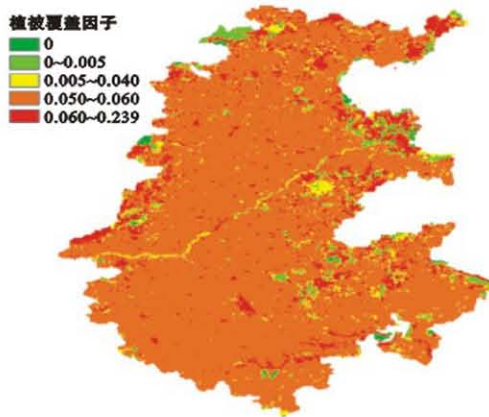
附图2 华北平原降雨侵蚀力(R值)分布



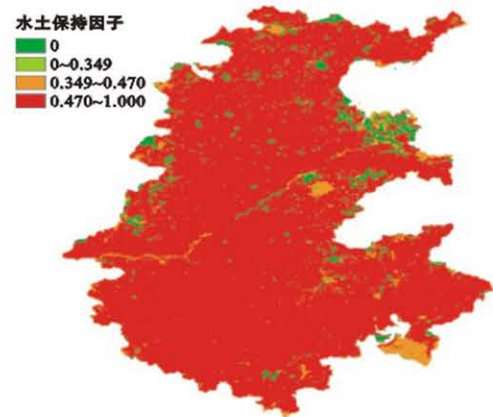
附图3 华北平原坡长因子(L值)分布



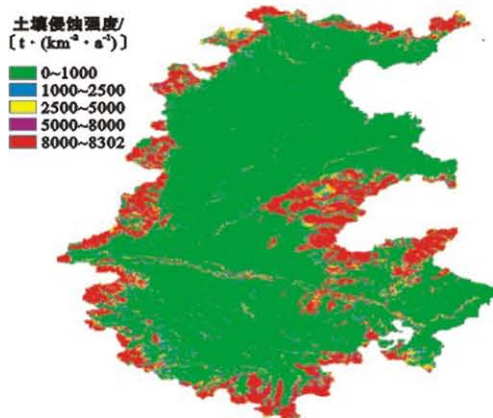
附图4 华北平原坡度因子(S值)分布



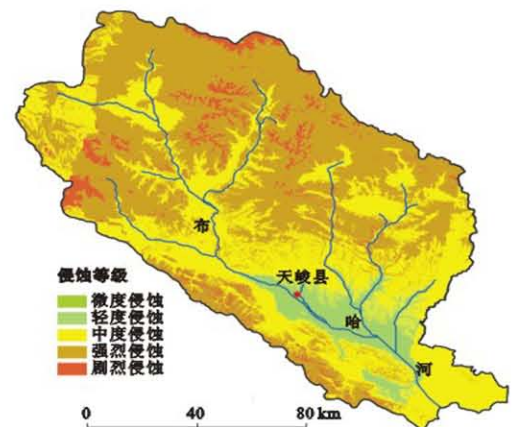
附图5 华北平原植被覆盖因子(C值)分布



附图6 华北平原水土保持因子(P值)分布



附图7 华北平原土壤侵蚀强度等级分布



附图8 布哈河流域土壤侵蚀等级分布