
水土保持监测与应用技术

基于 RUSLE 的线状开发建设项目区 土壤侵蚀动态监测

——以浙江省宁波市北环快速路工程为例

张涛¹, 金德钢¹, 佟光臣², 林杰², 唐鹏², 李陆平¹

(1. 宁波市水利水电规划设计研究院, 浙江 宁波 315192; 2. 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 全面调查浙江省宁波市北环快速路施工前后及施工过程中土壤侵蚀时空变化状况, 为今后线状生产建设项目水土保持遥感监测提供参考。[方法] 分别利用 2010 年宁波市土地利用/覆盖类型图、道路图及调查数据, 结合项目区地形图和实测高程点生成的数字高程模型 (DEM)、实测土壤属性数据、水文站降雨数据等资料分别获取 RUSLE 模型中各因子值的空间分布, 然后通过 RUSLE 模型计算项目区 3 个不同阶段的土壤侵蚀量, 最后进行分类统计。[结果] 项目施工前期和自然恢复期的土壤侵蚀均以微度侵蚀为主, 所占项目面积比例分别为 98.53% 和 99.73%; 而施工期的土壤侵蚀等级以轻度 and 微度侵蚀为主, 两者分别占项目区面积的 52.5% 和 35.4%; 项目施工期的平均土壤侵蚀模数为 1 380.9 t/(km²·a), 远高于施工前及施工期后的 251.3, 155.4 t/(km²·a)。[结论] 项目施工期土壤侵蚀区域主要分布在临时堆土区, 进一步分析发现坡度因素对土壤侵蚀空间分布具有重要影响。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE; 快速路工程; 宁波市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)05-0131-05

中图分类号: S157.1

文献参数: 张涛, 金德钢, 佟光臣, 等. 基于 RUSLE 的线状开发建设项目区土壤侵蚀动态监测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 131-135. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.029

Monitoring Soil Erosion in Linear Production and Construction Project Areas Based on RUSLE

—A Case Study of North Ring Expressway in Ningbo City, Zhejiang Province

ZHANG Tao, JIN Degang¹, TONG Guangchen², LIN Jie², TANG Peng², LI Luping¹

(1. Ningbo Hydraulic Waterpower Planning and Designing Research Institution, Ningbo, Zhejiang 315192, China; 2. College of Forest, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: [Objective] In order to provide references for the future remote sensing monitoring of soil and water conservation of the linear production and construction project in Ningbo City of Zhejiang Province, it is crucial to investigate the spatio-temporal distribution of soil erosion in ring expressway before and after construction and construction process. [Methods] Land use/cover map of Ningbo City in 2010, topographic map, map of North Ring expressway and field survey data was collected to derive digital elevation model (DEM). Rainfall data was collected from local hydrological station. Based on the collected data, the spatial distribution of the factors in RUSLE model was calculated, and soil erosion maps of the north ring expressway were estimated. Then, the soil erosion amount was calculated at three different stages by using RUSLE model. [Results] Slight erosion was dominant during preconstruction period and natural recovery period, which accounted for 98.53% and 99.73%, respectively. During construction period, mild erosion and slight erosion was the largest, which accounted for 52.5% and 35.4%, respectively. The average soil erosion modulus of construction period was 1 380.9 t/(km²·a), which was 251.3 and 155.4 t/(km²·a) higher than that of

收稿日期: 2015-12-04

修回日期: 2016-04-25

资助项目: 宁波市水利局 2016 年度水利科技项目“城市快速路水土流失遥感监测技术研究”(一般类-14)

第一作者: 张涛(1985—), 男(汉族), 江苏省淮安市人, 硕士, 工程师, 主要从事生产建设项目水土保持方案编制与监测。E-mail: 191866076@qq.com。

通讯作者: 林杰(1976—), 女(汉族), 辽宁省丹东市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀遥感监测研究。E-mail: jielin@njfu.edu.cn。

preconstruction period and nature recovery period, respectively. [Conclusion] Soil erosion during the construction period is mainly distributed in the temporary soil ground. Furthermore, the terrain factor has an important influence on the spatial distribution of soil erosion.

Keywords: soil erosion; reversed universal soil loss equation; expressway project; Ningbo City

2015年1月15日水利部水土保持司下发了关于进一步规范生产建设项目水土保持设施验收程序的通知,根据通知精神,严格水土保持监测,对于线路长、取弃土(渣)量大的生产建设项目,应包括项目建设前、建设中和建设后的遥感影像资料及其分析结果。2015年6月又颁布了《生产建设项目水土保持监测规程(试行)》,在第二款基本规定中明确提出对于点型项目水土流失防治责任范围不小于 100 hm^2 和线性项目山区(丘陵区)长度不小于 5 km ,平原区长度不小于 20 km 的应增加遥感监测方法。由此可见,国家对生产建设项目水土保持监测的重视程度。生产建设项目水土流失具有地域不完整性、影响因素复杂、突发性、潜在性、危害大等特点^[1],与点状、面状生产建设项目不同,线性生产建设项目水土流失具有空间跨度大、随时间而变的阶段性、治理措施多样化等特点^[2]。这些特点给较大规模线状工程水土保持监测带来一定的困难与挑战。水土流失监测是科学开展水土流失防治工作的基础和前提^[3]。目前线状开发建设项目土壤流失监测方法主要有简易坡面量测法、桩钉法、径流场与径流小区法、现场巡查法、遥感调查法、沉沙池沉积泥沙称重法等,存在的问题主要有监测频次难以确定、动力因子监测不足、高新技术引入与应用不足等。预测方法主要有通用土壤流失方程法、加速侵蚀系数法、类比分析法、弃流比法等,其中通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)及其修订方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)^[4]是一种经验模型,在世界各地得到广泛应用。有部分学者在高速公路水土流失预测中引入RUSLE模型,但由于参数取值困难、预测结果与实测值误差大等问题难以推广。主要原因在于项目区存在一定量坡度较陡的坡面,而模型主要适用于坡度在一定范围内的缓坡,造成预报值偏高,因此有必要进行因子修正。近年来,应用USLE/RUSLE结合GIS估算土壤侵蚀及其空间分布应用很广^[5-9]。本文拟采用常规定位观测方法和遥感调查相结合的方法,通过对影响北环快速路工程水土流失的各个因子的计算方法选择与处理,以期为后续线状工程水土保持动态监测提供实践参考。

1 研究区概况

北环快速路工程位于宁波市江北区,属亚热带海

洋性季风气候,温暖湿润,四季分明,夏秋季受台风灾难性气候影响频繁。年平均温度 $16.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 $41.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量 $1\ 517\text{ mm}$,年平均降水天数 150 d 以上,无霜期 $230\sim 240\text{ d}$,最大冻土深度 50 mm 。土壤主要为红壤、潮土和水稻土;植被类型属中亚热带常绿阔叶林北部地带浙闽甜槠、木荷林区,植被覆盖率 31.4% ;水土流失类型为微度水力侵蚀,允许土壤流失量为 $300\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

北环快速路工程项目范围西起前洋立交收费站,东至世纪大道,全长约 15.8 km 。经过的横向道路由西至东有:慈城连接线、广元大道、洪塘西路、机场快速路、大鸿路、江北大道、康桥南路、倪家堰路、戚山路、329国道、慈城南路等。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 土地利用数据 施工前期土地利用数据来源于宁波市国土资源局2010年土地利用现状图成果结合实测地形图数据;由于是分段施工,且施工过程中对原地表破坏极大,故研究区施工中土地利用数据全部认为是裸地。施工后期土地利用数据来源于实测数据。影像数据部分参考Google Earth米级数据。

2.1.2 高程图 高程数据来源于研究区地形图和实测点共 $7\ 876$ 个高程点,平均密度为每 120 m^2 1个。空间插值方法中IDW法和Kriging法使用较为常见,其中IDW法在采样点较为密集且均匀分布时精度较高,对数据分析后本文使用IDW(反距离权重插值)处理,考虑到土地利用数据的分辨率,最终输出像元为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 。

2.1.3 年降雨量数据 降雨量数据来源于宁波市3个水文站(分别是骆驼桥站、慈溪站和姚江大闸站)的2011—2014年的日降雨数据,由于研究区范围和雨量站点的限制,本文没有采取地统计中克里金空间插值的方法,而是取3个雨量站的平均值作为研究区的降雨侵蚀力值。

2.1.4 北环快速路数据 北环快速路范围数据来源于规划红线及可能产生影响的区域。

2.2 研究方法

RUSLE模型(revised universal soil loss equation),即修正的通用土壤流失模型,用以计算项目区

年平均土壤侵蚀量。其计算表达式为:

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

式中: A ——年平均土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$];
 R ——降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$];
 K ——土壤可蚀性因子 [$t \cdot (hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$];
 LS ——坡长与坡度因子,无量纲;
 C ——植被覆盖与管理因子,无量纲;
 P ——水土保持措施因子,无量纲。

2.2.1 R 因子提取 参考章文波等提出的利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究^[10]。主要公式如下:

$$M = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \quad (2)$$

式中: M ——某半月时段的侵蚀力值 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$];
 k ——该半月时段内的降雨天数(d);
 P_j ——半月时段内第 j 天的日雨量,要求日雨量 ≥ 12 mm,否则以 0 计算,阈值 12 mm 与中国侵蚀性降雨

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp\left[-0.0256 S_{an} \left(1 - \frac{S_{il}}{100}\right)\right] \right\} \times \left(\frac{S_{il}}{C_{la} + S_{il}}\right)^{0.3} \times \left\{ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right\} \times \left\{ 1 - \frac{0.7S_{n1}}{S_{n1} + \exp(-5.51 + 22.9S_{n1})} \right\} \quad (5)$$

式中: S_{an} ——砂粒含量(%); S_{il} ——粉粒含量(%);
 C_{la} ——黏粒含量(%); C ——有机质含量(%); $S_{n1} = 1 - S_{an}/100$ 。最终计算结果如下:

表 1 不同土地利用类型 K 值分布

土地利用类型	K 值
水田	0.032
旱地	0.029
园地	0.036
草地	0.018
水域	0
裸地 1	0.041
裸地 2	0.048
交通建设用地	0

注:裸地 1 为压实的裸地;裸地 2 为松散的裸地; k 值单位为 [$t \cdot (hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]。

2.2.3 LS 因子提取 本文使用水利部 2012 年颁布的水土保持遥感监测技术规范(SL592-2012)中采用的坡度与坡长因子计算方法,但是对坡度因子中部分参数参考刘宝元^[14]陡坡公式进行了修订。

坡度因子计算公式:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5) \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & (5 \leq \theta < 10) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 10) \end{cases} \quad (6)$$

坡长因子计算公式:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^M \quad (7)$$

标准一致^[11]。半月时段的划分以每月第 15 日为界,每月前 15 d 作为一个半月时段,该月剩下部分作为另一个半月时段,这样将全年依次划分为 24 个时段^[10]。

α, β 是模型参数,根据以下公式运算:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中: P_{d12} ——日雨量 ≥ 12 mm 的日平均雨量(mm);
 P_{y12} ——日雨量 ≥ 12 mm 的年平均雨量(mm)。

利用上述 3 个公式计算逐年各半月的降雨侵蚀力,累加后可得到年降雨侵蚀力值。

2.2.2 K 因子提取 K 值的计算方法主要有 3 种:直接测定法、诺谟图法及公式法^[12]。本文使用水利部 2012 年颁布的水土保持遥感监测技术规范(SL592-2012)中采用的 Williams 模型^[13]。

$$M = \begin{cases} 0.5 & (\theta > 5\%) \\ 0.4 & (3\% < \theta \leq 5\%) \\ 0.3 & (1\% < \theta \leq 3\%) \\ 0.2 & (\theta \leq 1\%) \end{cases} \quad (8)$$

式中: L ——坡长因子; λ ——水平投影坡长(m);
 M ——可变坡长指数,其中坡度和坡长因子是利用 DEM 数据根据 Van Remortel 提供的 AML 语言程序^[15]进行计算。

2.2.4 C, P 因子提取 C 因子的计算涉及到不同时间段不同成像条件下植被的差异、植被水平与垂直结构的考虑等故难确定,而 P 因子被认为是 RUSLE 模型中最难确定的因子,目前主要是依据土地利用类型赋值的方法确定 C, P 因子值。值得注意的是,虽然施工过程中大量的工程开挖等扰动导致一定量的较为松散的裸土,但仍有相当多压实板结的土壤,由于其它自然因素,扰动松散的裸土上很快就会被荒草覆盖,且随着时间推移覆盖度逐渐增大,加之人工苫盖等水土保持措施,施工过程中裸土的 C, P 因子取值更难确定。本研究参考了多篇论文^[16-18]后,结合项目区实际情况,最终采用表 2 的 C, P 因子取值。

2.2.5 实地定位观测 北环快速路沿线土壤侵蚀特征研究主要采用实地调查和野外试验相结合、定量分析和定性分析相结合的方法,本文通过采用桩钉法和坡面量细沟法对不同时段的的不同部位进行观测。

表 2 不同土地利用类型 C, P 因子值

土地利用类型	水田	旱地	园地	水域	城镇居民点 建设用地	荒草地	裸地
C	0.10	0.21	0.01	0	0	0.08	0.25
P	0.01	0.25	0.36	0	0	0.20	0.21

3 结果与分析

3.1 北环快速路整体土壤侵蚀状况及侵蚀等级变化分析

将 RUSLE 各因子统一制作成 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 栅格图,在 ArcGIS 中利用栅格计算器将各因子相乘并乘以 100,将单位从 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 转化成 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,得到了研究区 3 期土壤侵蚀分布图。根据水利部土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)中南方红壤丘陵区水力侵蚀强度分类标准,将研究区划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈 6 类,得到了研究区 3 期土壤侵蚀等级分布情况(表 3)。

表 3 宁波北环快速路不同阶段土壤侵蚀等级分布

侵蚀类别	侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	施工前 期比例	施工中 比例	自然恢复 期比例
微度侵蚀	<500	98.53	35.40	99.73
轻度侵蚀	500~2 500	1.20	52.50	0.26
中度侵蚀	2 500~5 000	0.20	8.10	0.01
强度侵蚀	5 000~8 000	0.04	2.30	0
极强度侵蚀	8 000~15 000	0.02	1.20	0
剧烈侵蚀	>15 000	0.01	0.50	0

2010 年(即施工前期)研究区土壤侵蚀模数在 $0 \sim 41\,324.7\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间,平均侵蚀模数为 $251.3\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,主要侵蚀等级是微度和轻度侵蚀,二者总和占到了 99.73%;2011—2014 年上半年(即施工期)研究区土壤侵蚀模数在 $94.7 \sim 56\,561\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间,平均侵蚀模数为 $1\,380.9\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,从强度分布上看,侵蚀等级以轻度和微度为主,强度及其以上占 5%;从面积变化上轻度侵蚀等级面积大幅增加,说明土壤侵蚀风险在加剧,主要原因是由于线状

工程路线较长,土石方、机械设备等搬运过程中,强烈扰动与破坏周边的水土资源,受雨水击溅和地表径流冲刷,容易产生水土流失。强度及其以上等级的侵蚀主要发生在公路两边的临时堆土区,主要原因是临时堆土结构疏松,土堆坡度较大,抗水力侵蚀、风力侵蚀能力极差。2014 年下半年到 2015 年(即自然恢复期)研究区土壤侵蚀模数在 $0 \sim 8\,199.4\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间,平均侵蚀模数为 $155.4\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,微度侵蚀占主要部分,少部分为轻度侵蚀,二者总和占到了 99.99%。此时工程已经完成,开挖裸露面和施工迹地已经采取了植物绿化措施,但由于植物措施还不能发挥作用,仍有水土流失发生,不过侵蚀程度均较轻。

在 RUSLE 模型中,土地利用类型的变化直接影响着 C, P 这 2 个因子,因此土地利用变化直接影响着土壤侵蚀的大小。另外,不同于大区域地貌不变或变化很小的情况,地形因子成为影响施工过程中土壤侵蚀强度及其分布的主要因子之一,因为在施工过程中人为因素强烈地影响地表地貌,主要体现在临时堆土区。而降雨侵蚀力因子 R,由于气象因素属于自然因素,在短期内无明显变化规律,故难以控制。

综上所述,在生产建设施工过程中,地表覆被类型与地形地貌对土壤侵蚀模数的大小起着至关重要的作用,需要通过人为因素施加影响而进行控制。另外考虑到研究区的气候条件,这里夏季经常是台风暴雨中心,降雨侵蚀力因子 R 极大,因此强烈建议施工单位在施工过程中,对临时堆土区采取临时拦挡、苦盖等工程措施,辅助植草等植被措施,最大限度降低由人为因素造成的水土流失。

3.2 模型验证

由表 4 可以看出,模型预测值与实测值总体接近,其中施工中主体施工区预测数据比实测数据大了 2 个等级,施工生产生活区大了一个等级,其他地方在侵蚀等级上是完全一致的,只是在具体大小上略微有差异。由此可见,利用 RUSLE 模型来模拟预测生产建设项目水土流失是可行的,但是精度需要进一步提高。

表 4 研究区不同施工阶段预测数据与实测数据的比较

t/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)

施工前期		施工中			自然恢复期			
地貌	预测数据	实测平均土壤侵蚀模数	地貌	预测数据	实测平均土壤侵蚀模数	地貌	预测数据	实测平均土壤侵蚀模数
旱地	微度 385	微度 300	临时堆土区	剧烈 21 035	剧烈 19 548	草地	微度 96	微度 413
菜地	微度 385	微度 300	施工生产生活区	轻度 505	微度 274	苗圃	微度 108	微度 372
原交通建设用地	微度 0	微度 0	主体施工区	强度 5 024	轻度 2 100	交通建设用地	微度 0	微度 0

4 讨论与结论

本文将修正的通用土壤流失方程引入实际生产建设项目之中,结合GIS技术定量研究了土壤侵蚀影响各因子的方法,以期为建设类项目水土流失预测提供参考。通过估算北环快速路不同施工阶段土壤侵蚀强度的分布,发现在空间分布上,土壤侵蚀主要集中在分布在地形扰动较大的临时堆土区;在侵蚀程度上,施工过程中侵蚀等级以微度和轻度为主,而施工前期和自然恢复期基本上是微度侵蚀,在侵蚀数量上,土地利用/覆被是造成土壤侵蚀增加的重要因素。

宁波北环快速路水土保持工作应从工程措施和植被措施2方面着手。主体工程水土保持措施主要包括:排水工程、绿化工程、边坡防护工程、表土集中堆放和保护、临时排水、沉沙等;施工场地水土保持措施主要有施工场地的表土剥离、临时拦挡、苫盖、临时排水、沉沙及施工结束后的土地整治利用等;施工便道水土保持措施主要有排水、沉沙、临时性防护、护坡,以及施工结束后土地整治利用。

影响土壤侵蚀各因子的因素有很多,在R因子计算方面,还可以运用其它方法结合降雨过程数据、次降雨量、雨强等资料计算;另外关于C、P因子的赋值不同文献也有不同方法;在地形因子提取的过程中,还需要大量野外长期定位观测数据作支撑。综上所述,RUSLE只是一个经验模型,而生产建设项目区下垫面的复杂性也给模型预测带来了困难。从本次计算结果来看,土壤侵蚀模数的大小分布跟实测数据大体吻合,但如何继续提高预测的准确性,还需要对生产建设项目水土流失自身的特殊性作进一步的分析。

[参 考 文 献]

- [1] 宋小强,张长印,刘杰. 开发建设项目水土流失成因和特点分析[J]. 水土保持通报,2007,27(5):108-113.
- [2] 吴永红. 线形开发建设项目水土保持监测技术[J]. 水土保持通报,2003,23(4):33-35.
- [3] 胡玉平. 高速公路建设期水土流失监测方法分析研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2004.
- [4] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Washington, DC: US Government Printing Office, 1997.
- [5] Fernandez C, Wu J Q, McCool D K, et al. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,58(3):128-136.
- [6] Fu Guobin, Shulin Chen, McCool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS[J]. Soil and Tillage Research, 2006,85(1):38-49.
- [7] Shi Z H, Cai C F, Ding S W, et al. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: A case study in the Three Gorge Area of China [J]. Catena, 2004, 55(1): 33-48.
- [8] 李铨,李俊祥,朱飞鸽,等. 基于RUSLE的环杭州湾地区土壤侵蚀敏感性评价及关键敏感因子识别[J]. 应用生态学报,2009,20(7):1577-1585.
- [9] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等. 基于GIS/RS和USLE鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J]. 农业工程学报,2011,27(2):337-344.
- [10] 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.
- [11] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [12] 卜兆宏,李全英. 土壤可蚀性(K)值图的编制方法的初步研究[J]. 遥感技术与应用,1994(4):22-27.
- [13] Williams J, Nearing M, Nicks A, et al. Using soil erosion models for global change studies. Journal of Soil and Water Conservation, 1996,51(5):381-385.
- [14] Liu Baoyuan, Mark A. Nearing, Mark Risse. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE,1994,37(6):1835-1840.
- [15] Van Remortel R, Maichle R, Hickey R. Computing the RUSLE LS Factor through array-based slope length processing of digital elevation data using a C++ executable[J]. Computers and Geosciences, 2004,30(9/10):1043-1053.
- [16] CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, et al. 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.
- [17] Zhou Bin, Yang Bailin, Hong Yetang, et al. Study on quantitative remote sensing monitoring of soil erosion in karst areas based on GIS-as exemplified by Anshun City, Guizhou[J]. Acta Mineral Sin, 2000,20(1):13-21.
- [18] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-20.