

# 小流域尺度土壤可蚀性( K 值)的变异及 不同采样密度对其估值精度的影响

杨萍<sup>1</sup>, 胡续礼<sup>1,2</sup>, 姜小三<sup>1</sup>, 何旭东<sup>3</sup>, 潘剑君<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095;

2. 淮河流域水土保持监测中心站, 安徽 蚌埠 233001; 3. 河南省鲁山县水土保持科学试验站, 河南 鲁山 467300)

**摘要:**以观音寺小流域为例,通过高密度采样,利用 EPIC 模型中土壤可蚀性  $K$  值计算公式计算了可蚀性  $K$  值,并运用逆距离加权插值方法生成了研究区的  $K$  值分布图。经典统计学方法分析表明,在小流域尺度下土壤可蚀性  $K$  值存在很强的空间变异性,其变异系数达 39.94%。因此,定量监测、评价流域水土流失时, $K$  值的这种空间变异性不能忽略。对不同采样密度下  $K$  值空间估值精度的评价表明,当采样点数目均匀地减少一半时,即 4 个/ $\text{km}^2$  的样点密度下, $K$  值估计误差仍然可以控制在 25% 以内。

**关键词:**土壤可蚀性( $K$ 值);空间变异;采样密度;小流域尺度

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2006)06—0035—05

中图分类号: S157

## Spatial Variability of Soil Erodibility $K$ Value and Influence of Sampling Densities on $K$ Value Accuracy at a Scale of Small Watershed

YANG Ping<sup>1</sup>, HU Xu-li<sup>1,2</sup>, JIANG Xiao-san<sup>1</sup>, HE Xu-dong<sup>3</sup>, PAN Jian-jun<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing,

Jiangsu 210095, China; 2. Water and Soil Conservation Monitoring Central Station of the Huai River Basin,

Bengbu, Anhui 230003, China; 3. Lushan Station of Water and Soil Conservation, Lushan, Henan 467300, China)

**Abstract:** Taking the Guangyinsi watershed as an example, soil erodibility  $K$  values were calculated using EPIC model at large sampling densities, and the distribution map of  $K$  values was made using inverse distance weighting spatial interpolation. Classical statistical analyses show significant spatial variability of soil erodibility  $K$  values at a scale of small watershed, the variance coefficient of which is 39.94%. Therefore, the spatial variability should be taken into account in soil erosion monitoring at a scale of small watershed. The relative error of  $K$  values is less than 25% when half of the total samples, 4 samples per square kilometer, are taken.

**Keywords:** soil erodibility  $K$  Value; spatial variability; sampling densities; small watershed scale

土壤可蚀性(Soil Erodibility)是指土壤是否易受侵蚀动力破坏的性能,即土壤对侵蚀介质剥蚀和搬运的敏感性<sup>[1]</sup>。国际上通常用  $K$  值来衡量土壤可蚀性,它是评价土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运难易程度的一项指标<sup>[2]</sup>,也是众多土壤侵蚀预报模型中的必要参数之一。 $K$  值的研究对认识土壤机理和预测土壤侵蚀过程,以及合理进行土壤侵蚀防治均有极重要的意义。

自 20 世纪 80 年代 USLE 方程引入以来,我国学者对土壤可蚀性( $K$  值)进行了许多研究。如阮伏水<sup>[3]</sup>、刘宝元等人评述了土壤可蚀性指标与测定方法<sup>[4]</sup>;卜兆宏<sup>[5]</sup>、张科利<sup>[6]</sup>、梁音<sup>[7]</sup>等人分别用不同

的模型计算了太湖流域苏皖汇流区、黄土高原地区和长江以南东部丘陵山区的土壤可蚀性  $K$  值,并分析了其空间分布特征;杨子生等人对滇东北山区坡耕地土壤进行了 3 a 实测,建立起研究区土壤  $K$  值的修正诺谟公式<sup>[8]</sup>。综合以上研究,可以看出对  $K$  值的认识持有两种观点:一种观点认为作为某种土壤易蚀性的衡量指标, $K$  值应是特定的和惟一的,否则便会失去评价意义;另一种观点认为  $K$  值存在不惟一性,即存在时间上、空间上的变化。有关研究表明,土壤可蚀性  $K$  值受土壤化学性质的影响较小,更多地受土壤物理特性的影响<sup>[9-10]</sup>。而土壤物理性质即使在同一种土壤条件下也存在明显的空间变异性<sup>[6,11-12]</sup>,

收稿日期:2006-05-26

修稿日期:2006-07-06

基金项目:淮河流域重点区域水土流失监测专题研究

作者简介:杨萍(1979—),女(满族),辽宁省抚顺人,在读硕士研究生,研究方向为 3S 技术及应用。E-mail:yapi1998@163.com。

通讯作者:潘剑君(1959—),男(汉族),江苏省溧阳人,博士,教授,博士生导师,研究方向为农业资源环境与信息技术应用。电话(025) 84395329, E-mail:jpan@njau.edu.cn。

故精确定量地监测预报区域土壤侵蚀亦必须考虑这种空间变异性。以往的研究通常是按照土壤类型计算  $K$  值,忽略了  $K$  值在空间上的变异。本文以观音寺小流域为例,通过高密度采样,定量分析评价了小流域尺度下土壤可蚀性  $K$  值的空间变异特征,并探讨了不同采样密度条件下,对  $K$  值估值精度的影响,为提高小流域水土流失定量监测精度,加强流域管理提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

观音寺小流域位于河南省淮河上游鲁山县观音寺乡境内,属淮河流域沙颍河水系。地理坐标为东经  $112^{\circ}44'6''$ — $112^{\circ}45'6''$ ,北纬  $33^{\circ}51'37''$ — $33^{\circ}55'24''$ ,小流域面积约为  $7.3 \text{ km}^2$ 。流域内地貌类型属低山丘陵区,岩性主要有石灰岩、片岩,土壤以坡黄土、立黄土为主,并有少量砂礓立黄土和软马骨石土。流域内的水土流失以水蚀为主,侵蚀方式多为面蚀。由于坡度较大,植被覆盖率低,暴雨集中,再加入人为活动频繁等因素,容易造成水土流失。

### 1.2 土壤样品采集与处理

2005年10月20日在研究区采集了59个土壤样品,并使用GPS记录样点位置,样点分布图见图1。采集样点表层0—20 cm的土壤,实验室测定土壤机械组成和土壤有机质含量。土壤机械组成测定采取比重计法<sup>[13]</sup>,粒径分级为:2~0.1 mm,0.1~0.002 mm,<0.002 mm;土壤有机质含量测定采用浓硫酸—重铬酸钾氧化法<sup>[14]</sup>。

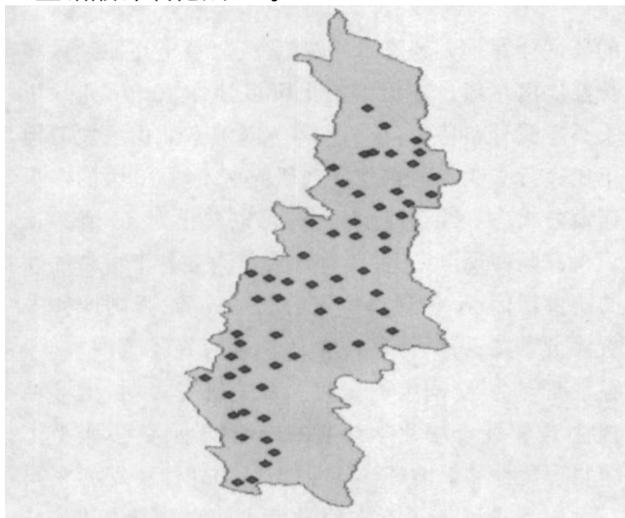


图1 研究区样点分布图

### 1.3 土壤可蚀性 $K$ 值的计算

土壤可蚀性研究开始于20世纪30年代,到目前为止已经出现了大量的定量化土壤因子评价模型,如

美国通用土壤流失方程 USLE<sup>[15]</sup>及其修正模型 RUSLE<sup>[16]</sup>、侵蚀生产力影响模型 EPIC<sup>[17]</sup>和土壤水蚀物理过程模型 WEPP<sup>[18]</sup>等。在各模型中都提出计算土壤可蚀性  $K$  值的公式。国内学者方纲清、郭志民和王小丹等人在研究中采用的就是 EPIC 模型的  $K$  值计算公式。本研究考虑到研究区域可获得的基础资料和数据,以及计算结果的科学性和可操作性,也采用了由 Williams 等人在 EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) 模型中,把土壤可蚀性因子  $K$  值的计算公式发展而成的公式:

$$K = \left( 0.2 + 0.3 \exp[-0.0456 SAN(1 - SIL/100)] \left( \frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \right) \left( 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 0.95C)} \right) \left( 1.0 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)} \right) \quad (1)$$

式中:  $SAN$  ——砂粒含量(%);  $SIL$  ——粉粒含量(%);  $CLA$  ——黏粒含量(%);  $C$  ——有机碳含量(%);  $SN1 = 1 - SAN/100$ 。

将研究区土壤样品的测定结果代入(1)式中,计算出观音寺小流域不同样点的土壤可蚀性  $K$  值。

### 1.4 $K$ 值图制作方法

$K$  值图的生成是通过空间插值实现的,一般借助 ArcGIS 中的空间分析模块 Spatial Analyst 来完成。空间插值是将田间测定间距较大的养分数据应用地统计学方法,对未测点进行插值,形成间距较小的点数据或者不同面积单元的面状数据。目前系统中比较常见的插值分析方法是逆距离加权插值和克里格插值。逆距离加权插值是最常用的确定性内插方法之一,它认为与未采样点距离最近的若干个点对未采样点值的贡献最大,其贡献与距离成反比。它也是一个全局插值算法,在插值计算过程中只考虑距离因素,避免了模型选择不当对插值的影响。本研究中采用逆距离加权插值法。

首先将研究区 1:10 000 的地形图在 ArcMap 中进行数字化,得到小流域边界图。然后把土壤样点的可蚀性  $K$  值表导入到 ArcMap 中,进行逆距离加权插值。用土壤可蚀性  $K$  值参加插值过程,Power 设定为 2,运用可变搜索半径指定输入点的数目 12 个,设置输出栅格的像元为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ,并以研究区边界为插值的“中断线”,这样就会得到研究区的  $K$  值栅格图。最后根据  $K$  值大小分布情况,将  $K$  值栅格图进行重新分级,用不同颜色表示,生成  $K$  值分布图。

### 1.5 精度评价

在计算土壤可蚀性  $K$  值时,土壤样点越多,代表性越强,误差越小;但是样点个数过多,则需要耗费大量的人力、物力和时间。本研究探讨了不同采样密度

条件下对 K 值估值精度的影响,以期找到小流域尺度下合适的样点密度,减少投入。精度评价指标选取相对误差、平均误差和均方根误差(RMSE)。首先在采集的 59 个土壤样点中均匀选取 50,40,30,20,7 (采用公里网格法标准)个样点数据进行空间插值,生成 K 值分布图,插值方法采用逆距离加权插值法。然后对剩余样点的 K 值实测值与估计值作相对误差分析。最后经计算得到不同采样密度下的平均误差与均方根误差(RMSE),讨论分析后得出结论。

(1) 相对误差评价。相对误差 % = (Y<sub>i</sub> - y<sub>i</sub>) / Y<sub>i</sub> × 100%, 其中 Y<sub>i</sub>, y<sub>i</sub> 分别为实测值与估计值。

(2) 均方根误差评价。采用国际上检验模型时常用的统计方法均方根误差对实测值与估计值之间

的符合度进行统计分析。RMSE 的值越小,表明估计值与实测值的一致性越好,实测值与估计值间的偏差越小。RMSE 可用以下的公式算出:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{n}}$$

式中: Y<sub>i</sub>, y<sub>i</sub> ——分别为实测值与估计值; n ——样本数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤可蚀性 K 值的描述性统计

经计算得到观音寺小流域 59 个样点的土壤可蚀性 K 值(表 1)。

表 1 观音寺小流域 59 个样点土壤可蚀性 K 值

编号	经度	纬度	土壤可蚀性 K 值	编号	经度	纬度	土壤可蚀性 K 值
1	112°44'2.6"	33°51'44.3"	0.3171	31	112°44'20.7"	33°53'17.9"	0.2334
2	112°44'7.1"	33°51'46.1"	0.1283	32	112°44'12.8"	33°53'18.0"	0.1221
3	112°44'10.8"	33°51'53.8"	0.3953	33	112°44'6.9"	33°53'19.4"	0.1670
4	112°44'13.6"	33°51'59.0"	0.2499	34	112°44'1.1"	33°53'20.7"	0.1857
5	112°44'10.8"	33°52'4.6"	0.1547	35	112°44'19.3"	33°53'45.6"	0.0408
6	112°44'9.6"	33°52'14.6"	0.1346	36	112°44'17.1"	33°53'30.8"	0.0935
7	112°44'8.0"	33°52'28.9"	0.2685	37	112°44'26.0"	33°53'41.6"	0.2064
8	112°44'11.8"	33°52'39.5"	0.2086	38	112°44'33.3"	33°53'41.4"	0.1220
9	112°44'17.3"	33°52'44.0"	0.2099	39	112°44'32.5"	33°53'47.5"	0.1296
10	112°44'28.4"	33°52'49.6"	0.3513	40	112°44'40.4"	33°53'54.9"	0.2269
11	112°44'37.7"	33°52'52.0"	0.1633	41	112°44'32.9"	33°54'0.4"	0.2148
12	112°44'47.3"	33°52'58.9"	0.0867	42	112°44'27.6"	33°54'4.8"	0.1104
13	112°44'44.5"	33°53'7.9"	0.3678	43	112°44'24.8"	33°54'11.7"	0.1091
14	112°44'41.6"	33°53'15.6"	0.1316	44	112°44'45.6"	33°54'2.9"	0.3288
15	112°44'10.6"	33°52'53.5"	0.2636	45	112°44'33.9"	33°54'18.9"	0.1709
16	112°44'2.6"	33°52'5.2"	0.1066	46	112°44'36.7"	33°54'20.0"	0.2714
17	112°44'59.7"	33°52'15.3"	0.2123	47	112°44'49.8"	33°54'16.4"	0.2883
18	112°44'3.0"	33°52'16.9"	0.1573	48	112°44'51.7"	33°54'21.7"	0.2957
19	112°44'57.2"	33°52'24.5"	0.2666	49	112°44'50.4"	33°54'26.9"	0.3192
20	112°44'49.7"	33°52'31.1"	0.2943	50	112°44'42.7"	33°54'20.2"	0.3297
21	112°44'57.2"	33°52'33.2"	0.2354	51	112°44'33.6"	33°54'40.2"	0.3111
22	112°44'56.9"	33°52'41.7"	0.3271	52	112°44'39.8"	33°54'32.5"	0.2833
23	112°44'1.5"	33°52'36.1"	0.1503	53	112°44'57.2"	33°54'11.1"	0.1311
24	112°44'58.3"	33°52'52.8"	0.1555	54	112°44'56.5"	33°54'2.8"	0.2363
25	112°44'59.8"	33°52'48.3"	0.2230	55	112°44'49.4"	33°53'58.2"	0.1051
26	112°44'4.0"	33°53'9.6"	0.1682	56	112°44'47.4"	33°53'51.9"	0.1030
27	112°44'10.6"	33°53'10.2"	0.1705	57	112°44'42.4"	33°53'42.2"	0.2953
28	112°44'24.0"	33°53'5.6"	0.2945	58	112°44'43.4"	33°53'35.8"	0.2384
29	112°44'29.6"	33°53'11.3"	0.1221	59	112°44'36.5"	33°53'25.5"	0.2002
30	112°44'28.4"	33°53'20.6"	0.3395				

按经典统计方法分析,得出土壤可蚀性  $K$  值的统计特征值(表 2)。其均值为 0.2123;变化范围为:0.0408~0.3953,可见,其测定值变化很大;其标准差为 0.0848;变异系数为 39.94%。按照反映离散程度变异系数的大小,可粗略分为 3 级:弱变异性,  $C_V < 10\%$ ;中等变异性,  $C_V = 10\% \sim 20\%$ ;强变异性,  $C_V > 20\%$ 。

表 2 土壤可蚀性  $K$  值统计特征值

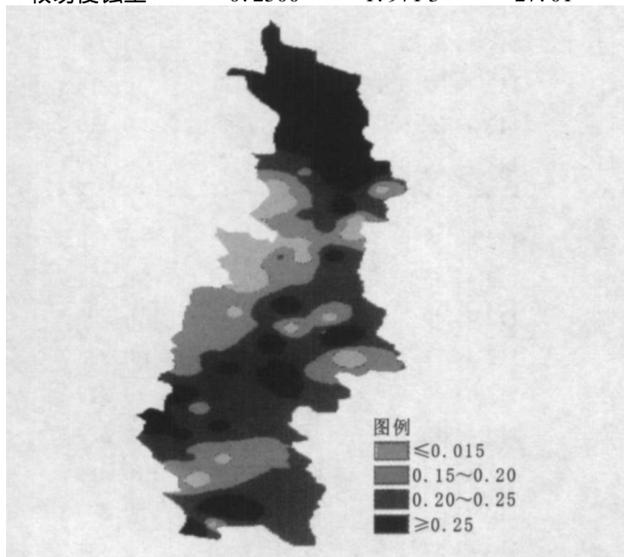
样本特性	样点数	最小值	最大值	中数	均值	极差	方差	标准差	变异系数/ %
$K$ 值	59	0.0408	0.3953	0.2099	0.2123	0.3545	0.0072	0.0848	39.94

## 2.2 研究区土壤可蚀性 $K$ 值的空间分布特征

研究区土壤可蚀性  $K$  值分级标准及不同类型  $K$  值分布面积见表 3,59 个样点插值生成的  $K$  值分布图见图 2。

表 3 研究区土壤可蚀性  $K$  值分级标准及不同类型  $K$  值分布面积

$K$ 值类型	$K$ 值变化范围	面积/ $\text{km}^2$	占流域面积/ %
难侵蚀土	0.1500	0.6424	8.80
较难侵蚀土	0.1500~0.2000	1.8185	24.91
易侵蚀土	0.2000~0.2500	2.8663	39.27
较易侵蚀土	0.2500	1.9713	27.01

图 2 观音寺小流域  $K$  值分布图(59 个样点)

研究区土壤的  $K$  值变化范围为 0.0408~0.3953,均值为 0.2123。 $K$  值的大小表示土壤抗侵蚀能力的强弱,  $K$  值越大,抗侵蚀能力越弱;反之,  $K$  值越小,抗侵蚀能力越强。研究区土壤可蚀性  $K$  值的空间分布特征为:难侵蚀土所占流域面积最小,为 8.80%;较难侵蚀土和较易侵蚀土占流域面积的比重相差不多,而易侵蚀土占流域面积最大,为 39.27%。

研究区变异系数大约为 40%,说明土壤可蚀性  $K$  值存在很强的变异性,因此不能忽略  $K$  值的这种空间变异。表 2 土壤可蚀性  $K$  值统计特征值中的其它统计特征值都与均值有关,因此,这些统计值只能在一定程度上反映样本总体,但是不能反映出样本是否具备独立性与相关性,解决这一问题的方法是进一步研究样点  $K$  值的空间变异性。

土壤可蚀性  $K$  值 0.20 的易侵蚀土和较易侵蚀土面积的总和占流域面积的 66.28%,说明该研究区易蚀性土壤面积较大。从  $K$  值分布图看,这部分土壤主要分布在小流域的北部、南部和中东部的大部分地区。

## 2.3 不同采样密度对 $K$ 值估值精度的影响

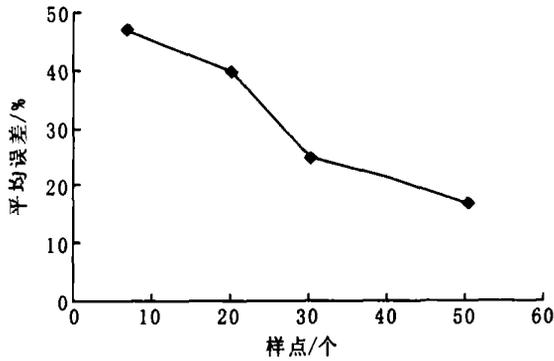
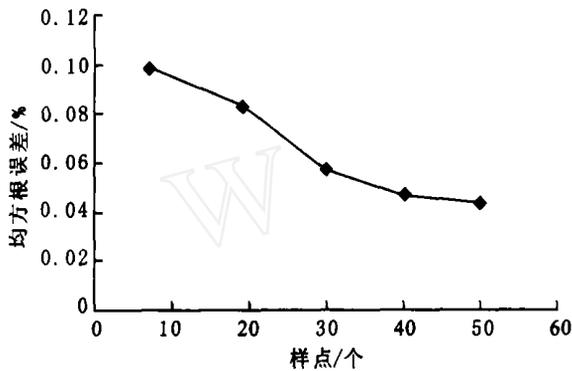
为了研究不同采样密度条件对  $K$  值估值精度的影响,在研究区的 59 个样点中均匀选取 50,40,30,20,7 个样点数据进行插值,生成  $K$  值分布图。把剩余样点作为检验样点,计算每个样点的相对误差、平均误差与均方根误差(RMSE)(表 4)。

表 4 不同采样密度对  $K$  值精度的影响

样点/个	检验样点/个	最大误差/ %	最小误差/ %	平均误差/ %	RMSE
50	9	38.00	3.75	17.17	0.0436
40	19	90.25	0.31	21.47	0.0467
30	29	90.07	0.07	24.80	0.0571
20	39	155.45	2.08	39.75	0.0819
7	52	295.23	0.90	46.99	0.0988

由表 4 不同采样密度对  $K$  值精度的影响可以看出,当插值数目为 50 和 40 个时,误差较小, RMSE 也较小,精度较高;当插值数目减少到 30 个时,平均误差为 24.80%, RMSE 为 0.0571,精度为 75.20%;但是当插值数目小于 30 个时,精度迅速降低,当插值数目为 7 个时,误差已接近 50%。

总之,当插值数目减少时,平均误差与均方根误差(RMSE)随之增大(图 3—4),精度也随之降低。综合考虑平均误差与均方根误差(RMSE)的大小可以认为:在观音寺小流域中,采样点的数目可以设定为 30 个,即 4 个/  $\text{km}^2$  的样点密度下,  $K$  值估计误差可以控制在 25%以内,说明在现有条件下还可以适当减少采样点数,节约人力、物力。

图3 不同采样密度下  $K$  值的平均误差图4 不同采样密度下  $K$  值的均方根误差

### 3 结论

(1) 在小流域尺度下,土壤可蚀性  $K$  值存在很强的变异性,其变异系数达 39.94%。因此,定量监测、评价流域水土流失时,应考虑  $K$  值的这种空间变异,以土壤类型计算  $K$  值可能存在较大的误差。

(2) 观音寺小流域土壤的  $K$  值变化范围为 0.0408~0.3953,均值为 0.2123。其空间分布特征为:难侵蚀土所占流域面积最小,易侵蚀土占流域面积最大。土壤可蚀性  $K$  0.20 的易侵蚀土和较易侵蚀土面积占总流域面积的 66.28%,说明该研究区易侵蚀性土壤面积较大,从  $K$  值分布图看,这部分土壤主要分布在小流域的北部、南部和中东部的大部分地区。因此,这些地区在今后要加强水土保持工作。

(3) 对不同采样密度下的  $K$  值进行空间估值的精度评价表明,在淮河中、上游地区,土壤采样控制在每  $1\text{ km}^2$  采 4 个样点的密度水平,基本上可以得到较高的采样精度。对于这个水平,再增加采样密度,对精度提高已不明显;若降低这个密度水平,则会明显引起精度问题。适宜的采样密度,对于同时兼顾研究费用与研究精度,十分重要。

致谢:本文在土壤样品采集过程中,得到尹黎明、丁飞、杨三平先生的帮助,特此致谢。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Lal R. 水土保持学会,黄河水利委员会宣传出版中心译 [C]. 可蚀性和侵蚀性 [A]. 北京:科学出版社,1991. 137—146.
- [2] 卜兆宏,李全英. 土壤可蚀性 ( $K$ ) 值图编制方法的初步研究 [J]. 农村生态环境 (学报), 1995, 11 (1): 5—9.
- [3] 阮伏水,吴雄海. 关于土壤可蚀性指标的讨论 [J]. 水土保持通报, 1996, 16 (6): 68—72.
- [4] 刘宝元,张科利,焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用 [J]. 自然资源学报, 1999, 14 (4): 345—350.
- [5] 卜兆宏,杨林章,卜宇行,等. 太湖流域苏皖汇流区土壤可蚀性  $K$  值及其应用的研究 [J]. 土壤学报, 2002, 39 (3): 296—300.
- [6] 张科利,蔡永明,刘宝元,等. 黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究 [J]. 生态学报, 2001, 21 (10): 1686—1695.
- [7] 梁音,史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性  $K$  值研究 [J]. 水土保持研究, 1999, 6 (2): 47—52.
- [8] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤可蚀性因子 [J]. 山地学报, 1999, 17 (增刊): 10—15.
- [9] 余清珠,师明洲. 半干旱黄土丘陵沟壑区人工混交林土壤抗蚀性研究初报 [J]. 水土保持通报, 1990, 10 (5): 5—9.
- [10] 陈明华,周伏建,黄炎和,等. 土壤可蚀性因子的研究 [J]. 水土保持学报, 1995, 9 (1): 19—24.
- [11] 何智英,马祥庆,俞新安,等. 炼山对杉木幼林地土壤肥力影响的动态研究 [J]. 土壤通报, 1993, 24 (3): 111—114.
- [12] 姜小三,潘剑君,杨林章,等. 土壤可蚀性  $K$  值的计算和  $K$  值图的制作方法研究 [J]. 土壤, 2004, 36 (2): 177—180.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000. 282—284.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版) [M]. 北京:中国农业出版社, 2002. 30—34.
- [15] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning [M]. In: Agricultural Handbook 537. Washington D C: USDA, 1978. 8—11.
- [16] 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]. In: Agricultural Handbook 703 [C]. Washington D C: USDA, 1997. 65—99.
- [17] 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: 381—383.
- [18] 张爱国,张平仓,杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究 [M]. 北京:地质出版社, 2003. 44—45.

(部分参考文献略)