

# 基于 GIS 的小流域土壤抗蚀性空间变异特征

林 杰<sup>1</sup>, 李海东<sup>2</sup>, 张金池<sup>1</sup>, 梦 莉<sup>1</sup>, 鄂轶静<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 南京 210037; 2. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042;  
3. 江苏省水文水资源勘测局镇江分局, 江苏 镇江 212003)

**摘 要:**运用 GS+7.0 和 Surfer 8.0 软件以邓下小流域为例,研究了苏南丘陵区小流域土壤抗蚀性的空间变异特征及土壤理化性质对其的影响,以期小流域的土壤侵蚀预报和综合治理提供依据。结果表明:土壤抗蚀性的变化范围为 0.180 8~0.968 1,均值为 0.647 7,变异系数为 27.69%,土壤抗蚀性具有中等程度的空间变异性。 $C_0/(C_0+C)$  值为 13.47%,小于 25%,表明在变程内具有强烈的空间相关性。研究区土壤抗蚀性总体分布趋势是条带状明显,波动较大,大于 0.65 的高值区域主要分布在小流域从南到北的中间部位,小于 0.4 的低值区域分布主要位于小流域地势较高的北部和东西两侧,容易发生水土流失。

**关键词:**小流域; GIS; 土壤抗蚀性; 空间变异; 苏南丘陵区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)02-0019-05

## Spatial Variability of Soil Anti-erodibility in a Small Watershed Based on GIS

LIN Jie<sup>1</sup>, LI Hai-dong<sup>2</sup>, ZHANG Jin-chi<sup>1</sup>, MENG Li<sup>1</sup>, E Yi-jing<sup>3</sup>

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;  
2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042,  
China; 3. Zhenjiang Hydrology & Water Resource Survey Bureau of Jiangsu Province, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Aiming at promoting the prediction precision of soil erosion and providing the basis for the management of soil and water conservation in the small watershed, the spatial variability characteristics of soil anti-erodibility and its relation to soil properties were studied based on a case of study on Dengxia catchment in hilly area of southern Jiangsu province by the GIS software of GS+7.0 and Surfer 8.0. The results showed: the spatial variability of anti-erodibility at the studied area was significant difference, with the range from 0.180 8 to 0.968 1, mean of 0.647 7, and variance coefficient of 27.69%. The  $C_0/(C_0+C)$  of soil anti-erodibility was 13.47%, that indicated that the soil anti-erodibility had strongly spatial self-relativity in the studied area. The whole distribution tendency of soil anti-erodibility presented belt-shaped obviously and fluctuated moderately, and the value of soil anti-erodibility was lower at the high region distributing at northern, eastern and western part of the catchment mainly, with soil and water loss arising easily.

**Key words:** small watershed; GIS; soil anti-erodibility; spatial variability; hilly area of southern Jiangsu province

土壤抗蚀性是指土壤抵抗雨滴打击和径流悬浮的能力,其大小主要取决于土粒和水的亲和力,亲和力越大,土壤越易分散悬浮,土壤团聚体越易受到破坏而解体,可用水稳性指数表示<sup>[1]</sup>。土壤水稳性指数( $K$ )是通过观测土壤团聚体在静水中的分散速度来衡量土壤抗蚀性大小的重要指标。本研究采用传

统统计学与地统计学原理相结合的方法,运用 GS+7.0 软件分析小流域土壤抗蚀性的半方差结构,通过 Kriging 插值用 Surfer 8.0 软件绘制土壤抗蚀性等值线图 and 三维线框图,研究土壤抗蚀性在小流域内的空间分布特征,以期小流域的土壤侵蚀预报和综合治理提供依据。

\* 收稿日期: 2008-07-14

基金项目: 国家“十一五”科技支撑课题 (2006BAD03A16)

作者简介: 林杰(1976-),女,博士生,讲师,研究方向为 3S 在水土保持中的应用。E-mail: nfulinjie@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地设在邓下小流域,位于南京市东南约 20 km、句容市西约 20 km 处。面积为 32.16 km<sup>2</sup>,地势西北高东南低,西北最高唐木山海拔为 282 m,东南最低处海拔为 13 m。区内黄龙埧水库总库容 220 万 m<sup>3</sup>,汇水面积 4.7 km<sup>2</sup>,属于句容河水系。流域内森林主要分布在黄龙埧水库、邓下水库、大成水库以北的山区。土壤以黄棕壤、红壤为主,最大冻结深度 - 0.09 m。属北亚热带季风气候区,四季分明,雨水充沛,光能资源充足,年平均温度为 15.7℃,年平均降雨 117 d,降雨量 1 106.5 mm,最大平均湿度 81%。最大风速 19.8 m/s,夏季主导风向为东南、东风,冬季主导风向为东北、东风,无霜期 237 d。每年 6 月下旬到 7 月中旬为梅雨季节,年度最佳气节为秋季 9 - 11 月。

### 1.2 研究资料

1.2.1 土壤样品采集及处理 2007 年 7 月初,在研究区内以 500 m × 500 m 的网格布设采样点,进行土壤样品采集。考虑到网格交点周围的土壤质地、地形、植被类型等因素,土壤样品采集时以网格交点为中心,半径 20 m 范围内随机采集 3 ~ 5 个小样品(土壤层为 0 - 20 cm),然后将其等量均匀混合作为一个土壤样品。用自封袋采集的土壤样品带回实验室内,自然风干、磨碎,分别过 7, 5, 2 mm 筛后备用。实验室测定的土壤理化性质有土壤抗蚀性、pH 值、机械组成、有机碳、全氮、全磷、速效钾等<sup>[2]</sup>。土壤水稳性指数采用金属网法测定(即选取直径 7 ~ 10 mm 自然风干土粒 50 颗,均匀放在孔径为 5 mm 金属网上,置静水中,以 1 min 为间隔,记录分散的粒数,持续 10 min,最后计算土壤的水稳性指数)<sup>[3]</sup>,做一个重复;pH 值采用电位测定法;土壤机械组成采取比重计法测定(粒径分级为:2 ~ 0.05 mm, 0.05 ~ 0.002 mm, < 0.002 mm);土壤有机碳含量采用浓硫酸 - 重铬酸钾氧化法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用酸溶 - 钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用乙酸铵浸提 - 火焰光度法测定。

1.2.2 数据资料 研究资料有 2006 年南京江宁淳化镇 1:10 000 地形图,2007 年 4 月野外调查绘制的土地利用现状图和南京水土保持地理信息系统(简称 NjSwc GIS,下同)中小流域边界数据。地形图是 AutoCad 格式,NjSwc GIS 中的小流域边界坐标是 .shp 矢量格式。

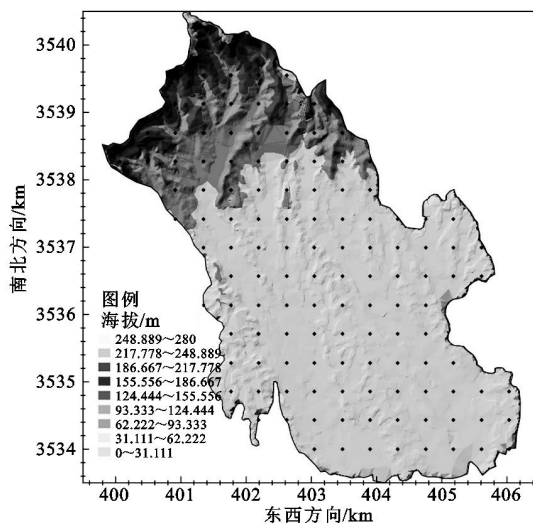


图 1 研究区样点分布图

### 1.3 研究方法

1.3.1 半方差函数分析法 地统计学是以区域化变量理论为基础,以半方差函数为基本工具的一种数据方法<sup>[4]</sup>。半方差函数是描述土壤性质空间变异结构的一个函数,反映了不同距离观测值的空间自相关程度,它的一些重要参数如块金值、基台值和变程等区域化变量是研究土壤特性空间变异的关键,同时也是进行空间布局估计的基础。半方差函数模型有球状(Spherical)、高斯(Gaussian)、指数(Exponential)和线性无基台、有基台值(Linear, Linear to sill)等模型。半方差函数假设随机函数均值稳定,方差存在且有限,该值仅和间距  $h$  有关,则半方差函数  $r(h)$  可定义为随机函数  $Z(x)$  增量方差的一半,即

$$r(h) = \frac{1}{2} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (1)$$

计算式为

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (2)$$

式中:  $r(h)$  ——半方差函数;  $h$  ——样点空间间隔距离,称为步长(Lag);  $N(h)$  ——观测样点对数;  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i+h)$  分别是区域化变量  $Z(x)$  在空间位置  $x_i$  和  $x_i+h$  的实测值;  $\frac{1}{2} [Z(x+h) - Z(x)]^2$  为  $Z(x)$  的增量方差。

1.3.2 克里格插值法 克里格插值(Kriging)方法是地统计中最常用的插值法,它利用原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量进行最优无偏估值的一种方法。设在一区域内位置  $x_0$  处某一变量的估值为  $Z^*(x_0)$ ,其周围在相关范围内有  $n$  个已测定值  $Z(x_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),现通过这  $n$  个测定值  $Z(x_i)$  的线性组合来求估测值  $r(h) = \frac{1}{2} [Z(x+h) - Z(x)]^2$ ,即

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \tag{3}$$

式中： $\lambda_i$ ——与  $Z(x_i)$  位置有关的加权系数。要使估测最优必须满足两个条件：(1) 无偏估计，即  $E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0$ ；(2) 方差最小，即  $\text{Var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = \min$ 。由以上几式，利用拉格朗日极小化原理，可以导出  $\lambda_i$  与半方差之间的矩阵

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} & 1 \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{10} \\ r_{20} \\ \dots \\ r_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中： $r_{ij} = \text{Cov}(x_i, x_j)$  间距为  $|x_i - x_j|$  的半方差；——拉格朗日算子。求解上式方程组得  $\lambda_i$  和  $\lambda_0$  值后，由 (4) 式可写出  $x_0$  点的最优估算  $Z^*(x_0)$ 。

2 结果与分析

2.1 经典统计特征及正态分布性检验

研究区土壤抗蚀性统计特征值列于表 1。可以看出，土壤抗蚀性的变化范围为 0.180 8~0.968 1，

表 1 土壤抗蚀性统计特征值

项目	最小值	最大值	均值	中值	标准差	变异系数/ %	偏度	峰度	K-S 检验吻合度	临界 K-S 统计 (α=0.10)
土壤抗蚀性 K	0.1808	0.9681	0.6477	0.668	0.1794	27.69	- 0.456	- 0.411	0.088	0.106

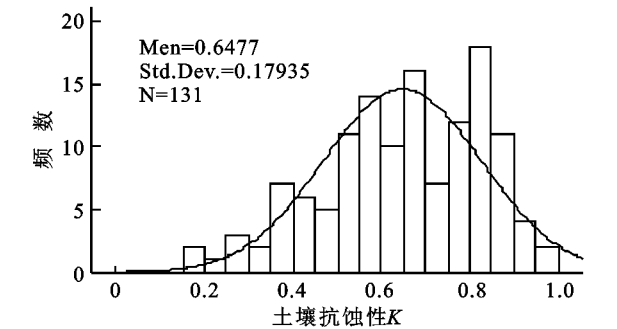


图 2 土壤抗蚀性频数统计图

2.2 半方差函数分析

半方差函数是地统计学解释土壤特性空间变异结构的理论基础。它有 3 个重要函数：块金值 (Nugget)、变程 (Range) 和基台值 (Sill)，其中变程反映土壤抗蚀性的空间变异特性，在变程外土壤抗蚀性空间独立，在变程内相关。块金值由测量误差和最小取样间距内土壤性质 (施肥、耕作措施、种植制度等) 的随机因子引起，基台值反映区域化变量受结构性因子 (土壤类型、母质、地形、气候等) 影响的程度。土壤抗蚀性的空间相关性可根据块金值与基台值之比  $C_0/(C_0 + C)$  划分<sup>[6]</sup>，该比值高，说明由随

最大值是最小值的 5.3 倍，可见测定值变幅较大。均值为 0.647 7，中值为 0.668，中值和均值接近，说明在研究内土壤抗蚀性  $K$  值分布比较均匀，未受到特异值影响。这与南京市城市土壤的水稳性指数相比普遍偏高，表明小流域土壤抗蚀性比城市土壤普遍偏高<sup>[5]</sup>。变异系数为 27.69%，可见土壤抗蚀性具有中等程度的空间变异性。上述统计只概括研究区土壤抗蚀性变异特征的全貌，没能反映其局部的变化特征，只在一定程度上反映样本全体，没能定量地刻画其随机性和结构性、独立性和相关性。因此，必须进一步采用地统计方法进行小流域土壤抗蚀性空间变异结构的分析。

数据的正态分布性是使用地统计学方法进行土壤抗蚀性空间分析的前提。利用 SPSS15.0 中 Frequencies 频数分布统计功能可得土壤抗蚀性的频数统计图 (见图 2)。由图 2 可以看出，土壤抗蚀性  $K$  值的频数分布呈倒钟形，基本符合正态分布。为了进一步明确其分布类型，对其进行非参数 Kolmogorov-Smirnov 检验，吻合度为 0.088，可见土壤抗蚀性符合正态分布，满足地统计分析的假设条件。

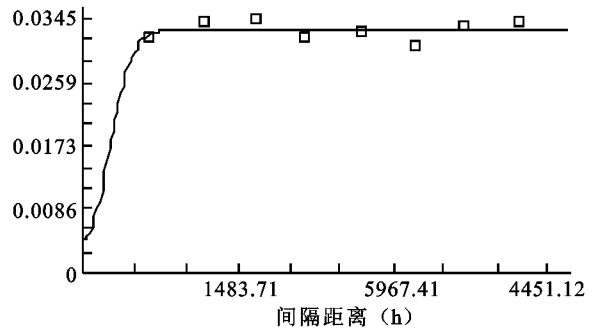


图 3 土壤抗蚀性的半方差模型图

机部分引起的空间变异性程度较大，相反则由结构性因素引起的空间变异性程度较大。当  $C_0/(C_0 + C) < 25\%$ ，变量具有强烈的空间相关性； $C_0/(C_0 + C)$  在 25%~75% 之间，变量具有中等的空间相关性；而当  $C_0/(C_0 + C) > 75\%$  时，变量空间相关性很弱<sup>[7]</sup>。半方差函数模型的选择是土壤抗蚀性空间变异结构分析的关键，本研究采用 GS+7.0 进行半方差理论函数模型选择 (见表 2)，计算出土壤抗蚀性的实验变异函数值。决定系数  $R^2$  越大，残差  $RSS$  越小，说明半方差函数模型越精确，经比对不同模型产生的  $C_0/(C_0 + C)$ 、 $R^2$ 、 $RSS$  等参数，选择高斯模

型为土壤抗蚀性的半方差函数理论模型(图 3)。

从表 2 和图 3 可以看出,当土壤抗蚀性的半方差函数理论模型为高斯模型时,块金值为 0.004 460,基台值为 0.033 120,  $C_0/(C_0+C)$  值为 13.47%,小于 25%,表明在变程内具有强烈的空间相关性,土壤结构性因素(土壤类型、母质、地形、气候等)是影响土壤抗蚀性空间变异的主要因素。

2.3 空间变异特征分析

运用 Surfer8.0 软件,选用其中的 Kriging 方法对土壤抗蚀性数据进行网格化,选择表 2 中的半方差函数理论模型,生成土壤抗蚀性等值线图(图 4)。从图 4 可以看出,研究区土壤抗蚀性波动较大,大于 0.65 的高值区域主要分布在小流域从南到北的中间部位,总体呈带状,由小流域地形分布(图 1)可以

看出,土壤抗蚀性较高处的地形较低,有机质容易累积。土壤抗蚀性小于 0.4 的低值区域主要分布在容易发生水土流失的地势较高处,主要位于小流域的北部和东西两侧。小流域北部是森林覆盖区、中南部是耕作种植及居住生活区,不同区域下垫面的差异及其人为干扰程度的不同也是影响土壤抗蚀性分布特征的重要随机性因素。

森林覆盖区植被类型的差异,不同植物的土壤根系生长、分布情况不同,土壤有机质的累积量也不同,影响着土壤抗侵蚀能力的强弱。中南部耕作种植及居住生活区由于长期以来受人类耕作种植、过度开发利用等,土壤有机质分解加速、累积量较低,土壤颗粒组成受干扰程度较大,土壤抗蚀性降低,土壤抗侵蚀能力减弱。

表 2 土壤抗蚀性的半方差函数理论模型及其相关参数

项目	理论模型	块金值	基台值	$C_0/(C_0+C)/\%$	变程/km	决定系数 $R^2$	残差
土壤抗蚀性 $K$	球形模型	0.001400	0.033100	4.23	705.000	0.046	$9.979 \times 10^{-6}$
	指数模型	0.003220	0.033140	9.72	519.000	0.074	$1.006 \times 10^{-5}$
	高斯模型	0.004460	0.033120	13.47	568.1127	0.081	$9.974 \times 10^{-6}$

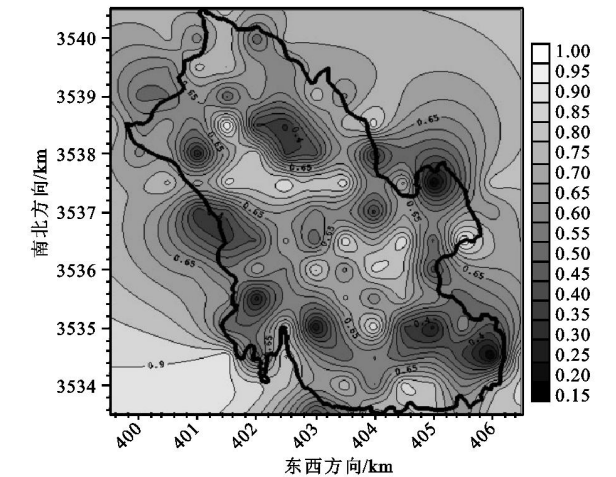


图 4 土壤抗蚀性等值线图

2.4 土壤理化性质对抗蚀性的影响

已有研究表明,土壤有机质、微团聚体及胶体含量对土壤抗蚀性有着重要的影响。土壤愈黏重,腐殖质含量多,形成较好的团聚体和土壤结构,提高土壤的水稳性指数,增强土壤抗蚀性。胡海波对江苏省沿海平原沙土区土壤的测定结果表明<sup>[8]</sup>,土壤有机质含量与土壤抗蚀性关系密切( $R^2=0.8933$ ),回

归公式为  $K=0.1305+0.5640X$ ,式中: $K$ ——土壤抗蚀性; $X$ ——土壤有机质含量(%)。

本研究选定土壤黏粒( $<0.002\text{ mm}$ )( $x_1$ )、粉(砂)粒( $0.002\sim0.05\text{ mm}$ )( $x_2$ )、砂粒( $0.05\sim2.0\text{ mm}$ )( $x_3$ )、pH 值( $x_4$ )、有机碳( $x_5$ )、全氮( $x_6$ )、全磷( $x_7$ )、速效钾( $x_8$ )等 8 个土壤理化指标进行相关分析,得到土壤理化性质与土壤抗蚀性的相关关系(见表 3)。

由表 3 可知,土壤抗蚀性与理化性质有着密切关系。土壤有机碳( $x_5$ )与土壤抗蚀性存在极显著相关关系,说明这些因素对土壤抗蚀性影响很大。另外,土壤黏粒( $<0.002\text{ mm}$ )( $x_1$ )、砂粒( $0.05\sim2.0\text{ mm}$ )( $x_3$ )、全氮( $x_6$ )对土壤抗蚀性也有较大影响。为进一步探求土壤理化性质对土壤抗蚀性的影响效应,以土壤理化性质为自变量,土壤抗蚀性为因变量,进行逐步回归分析,可得土壤抗蚀性的回归方程为: $Y=0.780-0.008x_1+0.6257x_5+0.3437x_6$ 。因子决定系数  $R^2=0.7829$ ,  $Pr>F$  概率为 0.000 1,说明方程拟合较好。从方程可以看出,土壤抗蚀性的影响因子主要是土壤黏粒( $<0.002\text{ mm}$ )( $x_1$ ),有机碳( $x_5$ ),全氮( $x_6$ )。

表 3 土壤抗蚀性与理化性质相关系数

土壤抗蚀性	土壤理化性质							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
	-0.263 *	0.023	-0.055 *	-0.268	0.797 **	0.607 *	-0.131	-0.046

\*  $\alpha=0.05$  显著水平, \*\*  $\alpha=0.01$  显著水平

3 结 论

研究区土壤抗蚀性的变化范围为 0.180 8 ~ 0.968 1,均值为 0.647 7,变异系数为 27.69 %,土壤抗蚀性具有中等程度的空间变异性。 $C_0/(C_0 + C)$  值为 13.47 %,小于 25 %,表明在变程内具有强烈的空间相关性。土壤抗蚀性总体分布趋势是条带状明显,波动较大,大于 0.65 的高值区域主要分布在小流域从南到北的中间部位,小于 0.4 的低值区域分布主要位于小流域地势较高的北部和东西两侧,容易发生水土流失。小流域不同区域下垫面的差异及其人为干扰程度的不同也是影响土壤抗蚀性分布特征的重要随机性因素。土壤抗蚀性与理化性质有着密切的关系,逐步回归分析可得出土壤抗蚀性的回归方程为:  $Y = 0.780 - 0.008x_1 + 0.6257x_5 + 0.3437x_6$ , 因子决定系数  $R^2 = 0.7829$ 。可见,土壤抗蚀性的影响因子主要是土壤黏粒 ( $< 0.002\text{ mm}$ ), 有机碳,全氮。

(上接第 18 页)

参考文献:

[1] 贾志军,蔡强国,Luk S H. 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究[M]. 北京:科学出版社,1992:32-39.

[2] 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京:科学出版社,1992:190-297.

[3] 卢宗凡,梁一民,刘国彬. 中国黄土高原生态农业[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997:56-67.

[4] 朱志诚. 陕北黄土高原植被群落研究[J]. 西北林学院学报,1993,8(1):87-94.

[5] 张雷明,上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J]. 干旱区研究,2002,19(4):59-63.

[6] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设[M]. 北京:科学出版社,1998:42-68.

[7] Munoz-Pardo J, Ruelle P, Vauclin M. Spatial variability of an agricultural field: geostatistical analysis of soil texture. Soil moisture and yield components of two rainfed crops[J]. Catena, 1990,17:359-381.

[8] Andrew W W, Günter B, Roder B G. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tar-

参考文献:

[1] 张金池,胡海波. 水土保持与防护林学[M]. 北京:中国林业出版社,1996.

[2] 中国林业标准汇编(营造林卷)[S]. 北京:中国林业出版社,1998.

[3] 水利电力部农林水利水土保持司. 水土保持试验规范[S]. 北京:水利电力出版社,1988.

[4] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999.

[5] 单奇华,李卫正,俞元春,等. 南京城市林业土壤可蚀性及影响因素[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(2):47-50.

[6] 李海东,林杰,张金池,等. 小流域尺度土壤有机碳和全氮空间变异特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(4):38-42.

[7] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils[J]. Soil Sci Soc Am J,1994,58:1501-1511.

[8] 胡海波,魏勇,仇才楼. 苏北沿海防护林土壤可蚀性的研究[J]. 水土保持研究,2001,8(1):150-154.

[9] rawarra catchment[J]. Journal of Hydrology, 1998, 205:20-37.

[9] 焦峰,温仲明,王飞,等. 黄土丘陵区县域尺度整体景观格局分析[J]. 水土保持学报,2005,19(2):167-170.

[10] 康绍忠. 农用水管理学[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2000.

[11] 夏自强. 土壤水资源特性分析[J]. 河海大学学报,2001,29(4):23-26.

[12] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京:农业出版社,1989:88-91.

[13] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社,2000:23-25.

[14] 马玉玺,杨文治,韩仕峰. 黄土高原刺槐生长动态研究[J]. 水土保持学报,1990,4(2):27-32.

[15] 李代琼,吴钦孝,刘克俭. 宁南沙棘、柠条蒸腾和土壤水分动态研究[J]. 中国水土保持,1990(6):29-45.

[16] 穆兴民,陈国良. 半干旱黄土丘陵区春小麦生长的水分生态效应[J]. 水土保持研究,1996,3(1):86-90.

[17] 吴钦孝,丁汉福,刘克俭. 黄土丘陵半干旱地区柠条根系的研究[J]. 水土保持通报,1989,9(3):45-49.

[18] 邹厚远,鲁子瑜,刘克俭. 沙打旺种群对土壤水分的影响及其调节[J]. 生态学杂志,1991,10(3):15-17.