

# 三峡库区植物篱系统土壤颗粒分形特征 及其与土壤理化性质的关系

黎建强<sup>1</sup>, 张洪江<sup>2</sup>, 陈奇伯<sup>1</sup>, 周红芬<sup>3</sup>

(1. 西南林业大学 环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;  
3. 昆明有色冶金设计研究院股份公司 水土保持工程技术部, 昆明 650051)

**摘要:**在对长江三峡库区坡耕地植物篱系统调查样地土壤样品颗粒分析的基础上,对植物篱系统内土壤颗粒分布及土壤分形维数与土壤物理性质和土壤养分含量的关系进行了研究,结果表明:(1) 乔木类、草本类和灌木类植物篱带间坡耕地土壤砂粒含量比其对应的植物篱带内土壤沙砾平均含量分别高 10.4%、13.7%和 9.2%;而黏粒含量在植物篱带内富集,其平均含量比植物篱带间坡耕地土壤黏粒含量分别高 14.3%、19.5%和 10.7%;(2) 土壤分形维数与土壤黏粒和土壤粉粒含量具有显著( $P < 0.01$ )的正相关关系,而与土壤砂粒含量显著负相关。(3) 土壤分形维数与土壤孔隙度、含水量和土壤饱和导水率极显著正相关,而土壤容重与分形维数呈显著负相关关系。土壤分形维数与土壤有机质、土壤全氮、土壤有效氮、土壤全钾、土壤有效钾、土壤全磷含量和阳离子交换量显著相关,而土壤有效磷含量和土壤分形维数相关性不显著。

**关键词:**植物篱; 土壤颗粒分形特征; 土壤理化性质; 相关关系

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0129-05

## Soil Particle-Size Fractal Characteristics and the Relationship with Physicochemical Properties of Soil in Hedgerow Systems in the Three Gorges Reservoir Area

LI Jian-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Hong-jiang<sup>2</sup>, CHEN Qi-bo<sup>1</sup>, ZHOU Hong-fen<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Department of Soil and Water Conservation Technology, Kunming Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Kunming 650051, China)

**Abstract:** To achieve well understanding of soil particle-size fractal characteristics and the volume fractal dimension ( $D_v$ ) variance among hedgerow agroforestry system, and also the correlations between  $D_v$  and soil physical properties and nutrients, soils sampled from inventory plots located in the Three Gorges Reservoir area of the Yangtze River were analyzed in this study.  $D_v$  was calculated and the relations between  $D_v$  and soil physicochemical properties were tested. The result indicated that: (1) sand concentrations of soil under hedgerows stripe were reduced by 14.3%, 19.5% and 10.7% respectively compared with those of soils taken from between hedgerows, the clay concentrations of soils under hedgerows stripe increased under hedgerow with the increment of 14.3%, 19.5% and 10.7%; (2)  $D_v$  was correlated positively and highly significantly ( $P < 0.01$ ) with the soil clay concentration and less significantly ( $P < 0.05$ ) with soil silt content, however,  $D_v$  was negatively correlated with soil sand concentration; (3)  $D_v$  of soil in hedgerow systems was correlated positively and highly significantly ( $P < 0.01$ ) with the soil porosity, water content, soil saturated water conductivity, and correlated negatively with soil bulk density. In addition, the  $D_v$  of soils in hedgerow systems were highly positively correlated with total and available nitrogen, total and exchangeable potassium, total phosphorus and cation exchangeable capacity.

**Key words:** hedgerow system; soil particle-size fractal characteristics; soil physicochemical properties; correlation

土壤颗粒分布 (Soil particle-size distribution, PSD), 通常代表了土壤黏粒、粉粒和砂粒所占的百分含量<sup>[1]</sup>, 是最根本的土壤物理特征之一, 它与土壤侵蚀、水文过程、土壤肥力状况等密切相关<sup>[1-2]</sup>。在土壤科学研究中, 分形理论被引入到土壤科学, 作为定量研究土壤颗粒分布的重要指标<sup>[3-4]</sup>, 运用土壤颗粒的分形维数来表征土壤质地和结构组成及其均匀程度, 已成为定量描述土壤结构特征的新方法<sup>[5]</sup>。目前, 测定土壤颗粒分布的经典技术包括筛分法和基于土壤颗粒沉降过程的吸管法和比重计法<sup>[6]</sup>, 然而, 近年来激光衍射技术 (laser diffraction, LD) 的发展和运用使土壤颗粒体积分布的准确测定成为现实, 可以利用激光粒度分析仪测得的土壤颗粒体积分布数据来统计土壤颗粒分布的分形维数<sup>[7]</sup>。

植物篱间作技术作为控制土壤流失、增加土壤肥力的重要坡耕地水土保持措施, 植物篱对土壤颗粒的拦截作用对土壤颗粒在坡面的重新分布具有重要的影响<sup>[8]</sup>。植物篱有利于控制土壤侵蚀和水土流失, 可以有效地拦截径流中的细颗粒物<sup>[9-10]</sup>, 从而使植物篱系统内土壤颗粒组成发生变化。因此, 土壤颗粒分布特征可以在一定程度上反映植物篱对坡耕地侵蚀过程的影响。然而, 对于坡面植物篱系统内土壤颗粒的分布的研究较少, 很少有学者运用分形理论来评价植物篱对土壤颗粒再分布的影响。本文运用土壤颗粒分形理论对植物篱系统土壤颗粒的分形特征进行了研究, 并分析了土壤体积分形维数与土壤物理性质和土壤养分含量的关系, 为运用土壤体积分形维数来评价植物篱系统内土壤颗粒分布、土壤物理性质和土壤养分状况提供理论依据。

## 1 研究区与研究对象概况

### 1.1 研究区概况

根据不同的植物篱类型, 结合地形地貌特点, 主要试验点布设在重庆市江津区。江津区位于长江中上游, 三峡库区尾端。江津区气候属北半球亚热带季风气候区, 年平均气温 18.4℃。年日照时数 1 273.6 h, 年降雨量 1 030.7 mm, 无霜期 341 d, 年湿度 81%。土壤主要为沙溪庙组沙页岩发育形成的紫色土和水稻土。

### 1.2 植物篱概况

根据植物篱的外貌特征和物种组成, 将不同的植物篱划分为乔木类、灌木类和草本类植物篱。乔木类植物篱物种主要为桑树 (*Morus alba*)、柑橘 (*Citrus reticulata*)、花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*)、梨树 (*Pyrus sorotina*) 和李子 (*Prunus cerasifera*)。灌木类植物篱物种包括: 黄荆 (*Vitex negundo*)、臭椿 (*Ailanthus altissima*)、八角枫 (*Alangium chinense*)。草

本类植物篱以紫背天葵 (*Gynura bicolor*)、旱菜 (*Herba Rorippae*)、空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 为主。调查区内植物篱种植年限为 5~7 a, 植物篱带宽 0.5~2 m, 盖度均 >90%, 带间耕地平均宽度在 4~6 m, 农作物以玉米 (*Zea mays*) 和红薯 (*Ipomoea batatas*) 为主。

## 2 研究方法

### 2.1 采样点布设

在调查区域随机布设调查样地 32 个 (其中乔木类植物篱 14 个, 草本类植物篱 10 个, 灌木类植物篱 8 个), 在每个调查样地内, 分别于植物篱带上 (植物篱冠层投影带上 ±20 cm 范围内)、植物篱带内 (植物篱冠层投影中点处)、植物篱带下 (植物篱冠层投影带下 ±20 cm 范围内) 和植物篱带间坡耕地 (两植物篱带间距的中点处), 各布设 1 个土壤采样点, 在每个土壤采样点土壤耕层 (0~20 cm) 采集土样, 每个采样点重复 3 次取样, 混合均匀并对土壤颗粒组成、土壤物理性质和土壤养分进行测定。

### 2.2 测定项目及方法

土壤颗粒组成采用激光颗粒分析仪 (Fritsch Particle Sizer Analysette 22) 测定, 土壤粒径在 0~2 500 μm 范围内被划分为 14 级, 根据美国制分类标准分为砂粒 (>0.02 mm)、粉粒 (0.02~0.002 mm) 和黏粒 (<0.002 mm)。土壤容重和孔隙度采用环刀法测定<sup>[11]</sup>; 土壤水分含量采用 TDR100 测定; 土壤饱和导水率采用定水头法测定<sup>[12]</sup>。土壤养分含量采用常规方法进行测定<sup>[11,13]</sup>, 土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法; 土壤全氮采用半微量凯氏定氮法分析; 有效氮采用碱解扩散法; 土壤全磷采用酸溶—钼锑抗比色法; 有效磷采用碳酸氢钠浸取—钼锑抗比色法分析; 土壤全钾采用酸溶—火焰光度计法; 速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度计法分析; 阳离子交换量采用醋酸铵交换法测定。

### 2.3 分形模型

土壤颗粒体积分形维数利用下式<sup>[3-4]</sup>计算:

$$\frac{V(r<R)}{V_T} = \left(\frac{R}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中:  $V(r<R)$ ——粒径小于  $R$  的土壤颗粒的累积体积之和;  $V_T$ ——各粒径土壤颗粒的总体积之和;  $R_{\max}$ ——土壤颗粒最大粒径;  $D$ ——土壤颗粒的体积分形维数。

对式 (1) 两边同时取对数可得:

$$\lg \frac{V(r<R)}{V_T} = (3-D) \lg \frac{R}{R_{\max}} \quad (2)$$

(3-D) 是  $\lg \frac{V(r<R)}{V_T}$  和  $\lg \frac{R}{R_{\max}}$  拟合直线的斜率, 因此利用最小二乘法可计算得到土壤颗粒体积分

形维数  $D$ 。

### 2.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 11.5 软件进行数据处理。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行差异显著性检验, 利用 Pearson 相关系数评价土壤颗粒的体积分形维数与土壤理化性质各指标之间的相关性。

## 3 结果与分析

### 3.1 植物篱系统土壤颗粒分布及其分形维数

3 种植物篱系统内土壤颗粒分布见表 1。3 种植物篱系统内土壤砂粒含量在不同位置具有一定的差

异性, 乔木类植物篱带间坡耕地土壤砂粒含量为 50.56%, 与植物篱带内和带下土壤砂粒含量具有显著性差异, 而与植物篱带上土壤砂粒含量差异不显著; 草本类植物篱带间坡耕地与植物篱带上土壤砂粒含量差异显著, 而与植物篱带内和带下土壤砂粒含量无显著差异; 灌木类植物篱带间坡耕地和植物篱带土壤砂粒含量显著, 其带间坡耕地和植物篱带内平均土壤砂粒含量分别为 45.56% 和 41.37%。乔木类、草本类和灌木类植物篱带间坡耕地土壤黏粒含量分别为 6.71%, 6.06% 和 7.42%, 除与乔木类和灌木类植物篱带下土壤黏粒含量无显著差异外, 均显著小于其对应的植物篱带内和带上土壤黏粒含量。

表 1 不同植物篱系统内土壤颗粒分布及其分形维数

植物篱种类	位置	颗粒组成/%			分形维数
		砂粒(0.25~0.02 mm)	粉粒(0.02~0.002 mm)	黏粒(<0.002 mm)	
乔木类(n=14)	带间坡耕地	50.56±8.81a	42.73±7.46b	6.71±1.38c	2.38±0.04b
	植物篱带上	45.45±8.22ab	46.79±7.18ab	7.76±1.10ab	2.40±0.03a
	植物篱带内	43.02±8.11b	48.62±6.89a	8.37±1.36a	2.42±0.03a
	植物篱带下	47.42±7.15ab	45.23±6.14ab	7.35±1.10bc	2.40±0.03ab
草本类(n=10)	带间坡耕地	55.67±10.82a	38.26±9.06b	6.07±1.94b	2.36±0.05c
	植物篱带上	44.80±8.34b	47.26±7.06a	7.95±1.32a	2.41±0.03ab
	植物篱带内	47.29±7.63ab	44.78±6.58ab	7.93±1.23a	2.41±0.02a
	植物篱带下	52.10±9.28ab	41.16±7.83ab	6.74±1.50ab	2.38±0.03bc
灌木类(n=8)	带间坡耕地	45.56±6.78a	47.03±6.52c	7.42±0.26d	2.40±0.04c
	植物篱带上	42.17±6.57b	49.55±6.49b	8.29±1.08b	2.42±0.01a
	植物篱带内	39.83±7.33c	51.56±7.90a	8.62±1.43a	2.42±0.03a
	植物篱带下	42.06±7.79b	49.93±9.80ab	8.02±1.01c	2.41±0.02b

注: 1) 表中数据为平均±标准差; 2) 同种类同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

3 种植物篱系统内土壤颗粒体积分形维数见表 1。乔木类带间坡耕地土壤分形维数分别为 2.38 与植物篱带内土壤分形维数差异显著, 而植物篱带内不同位置土壤分形维数无显著差异; 草本类植物带间坡耕地土壤分形维数为 2.36, 与植物篱带不同位置土壤分形维数差异显著; 灌木类植物篱带内和带上土壤分形维数均为 2.42, 与其带下和带间坡耕地土壤分形维数差异显著, 其土壤分形维数分别为 2.41 和 2.40。

### 3.2 土壤颗粒组成和土壤分形维数的关系

土壤分形维数与土壤颗粒组成的关系和模型见

图 1。

土壤分形维数与不同粒径级土壤颗粒含量具有显著的相关关系, 土壤分形维数与土壤砂粒含量呈显著的负相关关系, 而与土壤黏粒含量、粉粒含量极显著正相关。在极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 土壤分形维数与土壤砂粒、粉粒和黏粒的线性回归模型分别为:

$$y = -0.003x_1 + 2.562; y = 0.004x_2 + 2.217;$$

$$y = 0.023x_3 + 2.222$$

式中:  $y$ ——土壤分形维数;  $x_1$ ——土壤砂粒含量;  $x_2$ ——土壤粉粒含量;  $x_3$ ——土壤黏粒含量。

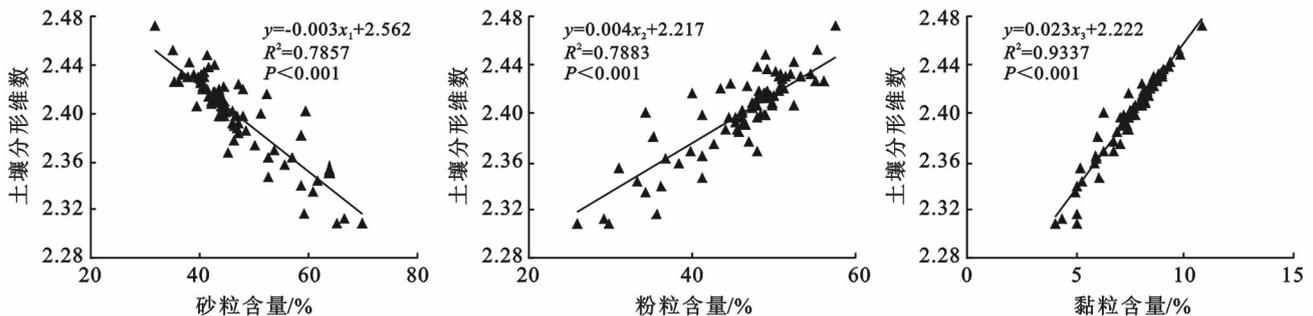


图 1 土壤分形维数与土壤砂粒、粉粒和黏粒的相关关系

### 3.3 土壤分形维数与土壤理化性质的关系

土壤分形维数与土壤物理性质和养分含量相关关系见表2和表3。土壤分形维数与土壤物理性质各指标的相关关系均达到了极显著水平。土壤分形维数与土壤孔隙度、土壤含水量和土壤饱和导水率为正相关关系,其相关系数分别为0.239,0.460和0.635,均大于 $r_{0.01}(128)=0.230$ ,即显著性水平 $P<0.01$ ,而土壤容重与分形维数呈显著负相关关系;土壤分形维数与土壤有机质、土壤全氮、土壤有效氮、土壤全钾、土壤有效钾和阳离子交换量的相关系数为分别为0.420,0.501,0.318,0.501,0.262和0.554,其相关

性水平 $P<0.01$ ,土壤全磷和土壤分形维数的相关性在显著性水平为 $P<0.05$ 时也显著相关,而土壤有效磷含量和土壤分形维数相关性不显著。

表2 土壤分形维数与土壤物理性质相关关系( $n=128$ )

变量	DV	BD	SP	VWC	SWC
分形维数(DV)	1				
土壤容重(BD)	-0.240**	1			
土壤孔隙度(SP)	0.239**	-1.000**	1		
土壤含水量(VWC)	0.460**	-0.304**	0.303**	1	
土壤饱和导水率(SWC)	0.635**	-0.548**	0.548**	0.493**	1

注: \*\* $P<0.01$ , \* $P<0.05$ ;下同。

表3 土壤分形维数与土壤养分相关关系( $n=128$ )

变量	DV	OM	TN	AN	TK	AK	TP	AP	CEC
分形维数(DV)	1								
土壤有机质(OM)	0.420**	1							
土壤全氮(TN)	0.501**	0.678**	1						
土壤有效氮(AN)	0.318**	0.627**	0.555**	1					
土壤全钾(TK)	0.501**	0.291**	0.428**	0.152	1				
土壤有效钾(AK)	0.262**	0.521**	0.457**	0.399**	0.040	1			
土壤全磷(TP)	0.226*	0.373**	0.250**	0.055	0.088	0.359**	1		
土壤有效磷(AP)	0.010	0.355**	0.124	0.247**	0.057	0.382**	0.451**	1	
阳离子交换量(CEC)	0.554**	0.354**	0.426**	0.240**	0.394**	0.334**	0.491**	-0.042	1

## 4 结论与讨论

植物篱系统内土壤颗粒分布和土壤颗粒体积分形维数在植物篱系统内不同位置具有一定的差异性,这种差异性主要表现为植物篱的拦截作用<sup>[14]</sup>,植物篱形成的生物梯局部影响着土壤侵蚀发生的强度和途径,从而影响径流泥沙在坡面的搬运—沉积过程<sup>[15-16]</sup>。土壤颗粒在坡面侵蚀的作用下,从植物篱带间坡耕地向下坡位移动,由于植物篱的物理拦截作用,土壤颗粒在植物篱带内和带前沉积、富集。而土壤细颗粒物比粗颗粒物在坡面径流的侵蚀作用下更容易流失<sup>[17]</sup>,因此,植物篱带间坡耕地土壤细颗粒物减少,粗颗粒增加,而植物篱带土壤细颗粒物富集,土壤黏粒含量增加。3种植物篱系统内土壤颗粒组成也存在一定的差异,灌木类植物篱带内土壤黏粒含量均高于乔木类和灌木类植物篱,这是由于灌木类植物篱密度大,植物篱带内近地表植物残体多,拦截土壤细颗粒的能力较强;乔木类植物篱主要以经济树种为主,其修剪的枝叶作为薪柴被输出植物篱系统,而草本类植物篱生物量较小,输入植物篱带内的植物残体量较少,因此拦截土壤细颗粒的能力较灌木类植物篱差。

土壤颗粒分形维数与不同粒径土壤的颗粒含量具有显著的相关性,即土壤分形维数与土壤砂粒、粉

粒和黏粒含量显著相关<sup>[18-20]</sup>,而土壤黏粒含量和土壤分形维数的相关系数为最大,因此,决定土壤分形维数的最关键因素为土壤黏粒含量的高低,具体来说,土壤黏粒含量越高,土壤体积分形维数越大<sup>[21-23]</sup>。由于对于土壤细颗粒的拦截作用和不同植物篱对土壤颗粒拦截的能力不同,使3种植物篱系统内土壤颗粒组成在植物篱不同位置具有一定的差异性,从而导致了植物篱系统内不同位置土壤体积分形维数的变化。

土壤颗粒分布通常由不同粒级土壤,即土壤砂粒、粉粒和黏粒的重量百分含量确定<sup>[24]</sup>,它对土壤水分运动、土壤的养分的保持和土壤有机质的矿化具有重要意义<sup>[25-26]</sup>。植物篱的枯枝落叶提供的有机质,有利于土壤团聚体的形成,促使土壤形成良好的结构从而土壤容重减小,土壤入渗性能得到改善和提高<sup>[14,27]</sup>。此外土壤细颗粒物在植物篱带内的增加有利于增加水土壤水分和土壤粒子的吸附力,土壤持水性能增强,阳离子交换量增大<sup>[28]</sup>。因此,在植物篱系统内土壤颗粒分形维数与土壤容重、孔隙度、土壤含水量和土壤饱和导水率具有显著的相关性。土壤颗粒分形维数与土壤有机质含量、土壤养分含量和阳离子交换量也具有显著的相关性,植物篱系统内植物篱带内土壤分形维数显著高于植物篱带间坡耕地,一方面是由于植物篱带内有机质的显著增加,植物篱枯枝落叶有利于植物篱系统内土壤有机质和土壤氮元

素的增加<sup>[29]</sup>,并且土壤中的养分元素可以通过有机质的矿化得到释放而增加。另一方面是土壤细颗粒物质的在植物篱带内的富集,由于土壤细颗粒物质是氮、磷、钾等养分元素的主要载体<sup>[17,30-31]</sup>,土壤细颗粒物质的增加必然导致土壤养分含量的提高和土壤保肥能力的增强。因此,土壤的颗粒分形维数和土壤养分含量具有显著的相关性,土壤体积分形维数可以用来评价植物篱系统内土壤颗粒分布、土壤物理性质和土壤养分状况,但是土壤分形维数在多大程度上能反映土壤物理性质和土壤的养分状况还需进一步研究和探讨。

#### 参考文献:

- [1] Gimenez D, Perfect E, Rawls W J, et al. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review[J]. *Engineering Geology*, 1997, 48(3): 161-183.
- [2] Huang G, Zhang R. Evaluation of soil water retention curve with the poresolid fractal model[J]. *Geoderma*, 2005, 127(1): 52-61.
- [3] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362-369.
- [4] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [5] Wang X, Li M H, Liu S, et al. Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2006, 134(1): 56-61.
- [6] Gee G W, Bauder J W. Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43(5): 1004-1007.
- [7] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 604-612.
- [8] 黎建强, 张洪江, 程金花, 等. 不同类型植物篱对长江上游坡耕地土壤养分含量及坡面分布的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2574-2580.
- [9] 廖晓勇, 陈治谏, 刘邵权, 等. 三峡库区紫色土坡耕地不同利用方式的水土流失特征[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 159-161.
- [10] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 等高植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 71-80.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 科技出版社, 1978.
- [12] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 中国农学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Young A. *Agroforestry for soil conservation* [M]. Wallingford, UK: CAB international, 1989.
- [15] Lal R. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol. II: Water runoff, soil erosion, and nutrient loss [J]. *Agroforestry Systems*, 1989, 8(2): 97-111.
- [16] Pellek R. Contour hedgerows and other soil conservation interventions for hilly terrain [J]. *Agroforestry Systems*, 1992, 17(2): 135-152.
- [17] Magette W L, Brinsfield R B, Palmer R E, et al. Nutrient and Sediment Removal by Vegetated Filter Stips [J]. *American Society of Agricultural Engineering*, 1989, 32(2): 663-667.
- [18] Bittelli M, Campbell G S, Flury M. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(4): 782-788.
- [19] Liu X, Zhang G, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China [J]. *Geoderma*, 2009, 154(1): 123-130.
- [20] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 74-78.
- [21] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 546-550.
- [22] Dur J C, Elsass F, Chaplain V, et al. The relationship between particle-size distribution by laser granulometry and image analysis by transmission electron microscopy in a soil clay fraction [J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55(2): 265-270.
- [23] Pieri L, Bittelli M, Pisa P R. Laser diffraction, transmission electron microscopy and image analysis to evaluate a bimodal Gaussian model for particle size distribution in soils [J]. *Geoderma*, 2006, 135: 118-132.
- [24] Martín M A, Taguas F J. An entropy-based parametrization of soil texture via fractal modelling of particlesize distribution [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, 457(2008): 937-947.
- [25] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [26] Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model [J]. *Biogeochemistry*, 1988, 5(1): 109-131.

## 4 结论与讨论

本文综合运用 AHP 法和熵值法对黑龙江省及所辖城市的土地利用生态效益进行了系统分析与评价,并用改进变异系数法进行了协调度评价。由 2000—2011 年土地利用生态效益核算结果及协调度分析表明:黑龙江省的土地利用生态效益值呈波动性上升的趋势,但总体水平不高,2005—2008 年波动最大;其所辖哈尔滨市、鹤岗市、佳木斯市、伊春市和绥化市在研究期内土地利用生态效益值增长最快,牡丹江市在研究期内生态效益值普遍不高,平均值在 0.43;研究期间,黑龙江省生态效益协调性曲线呈现先上升后下降趋势,其中,2005—2008 年全省及各个城市在研究期内的协调度状态为最佳时段。针对研究结果,结合各城市区域特点,为了提高土地利用生态效益,在以后的城市发展中,应该更多的注重经济结构的优化和循环经济的发展,加大对植被覆盖、自然保护区和生态环境建设的投入力度。丰富植被种类使其适应更多生物的生活环境,尤其对于种植植被种类单一,生态脆弱的城市,更应该注重增加生物多样性,防风固沙,保持水土,改善气候,防治自然灾害的发生。对于粮食高产区,提高粮食单产的同时要控制化肥、农药的施用量,宜多使用环保无公害的农家肥,适度退耕还林、还草和还湿,结合农田水利设施建设搞好土地整理、复垦和综合治理。在发展区域经济过程中,鼓励农、林、牧、渔及生态保护项目优先发展。增强环境保护意识,减少生活垃圾排放量,通过科技创新,降低能耗,发展清洁生产,减少“三废”的排放量,提高废水废气处理率和固体废弃物综合利用率。人们利用土地的观念意识直接影响土地利用的结果,因此,面对人类对环境的影响,提高环境保护意识是必不可少的,只有人们本身意识到自己的行为并对自身进行约束,才是最根本的解决办法。为实现土地利用的社会经济、生态环境协调发展重视生态效益向经济效益、社会效益和生态效益三方面均衡

(上接第 133 页)

- [27] Shi Z H, Chen L D, Cai C F. Effects of long-term fertilization and mulch on soil fertility in contour hedgerow systems: A case study on steep lands from the Three Gorges Area, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 84: 39-48.
- [28] 佟金,任露泉. 土壤颗粒尺寸分布及维及对粘附行为的影响[J]. *农业工程学报*, 1994, 10(3): 27-33.
- [29] Nelson R A, Cramb R A, Menz K M, et al. Cost-ben-

efit analysis of alternative forms of hedgerow intercropping in the Philippine uplands[J]. *Agroforestry Systems*, 1997, 39(3): 241-262.

### 参考文献:

- [1] 陈静,付梅臣,陶金,等. 唐山市土地利用效益评价及驱动机制[J]. *资源与产业*, 2010, 12(1): 60-63.
- [2] 吴志伟,胡远满,陈文波. 基于 GIS 技术的土地利用效益评价研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 75-79.
- [3] 颜开发,叶祥峰,苏黎馨. 城市土地利用效率评价及其耦合关系研究:以桂林市为例[J]. *海南师范大学学报:自然科学版*, 2011, 4(1): 440-453.
- [4] 汪鹏,杨庆媛,文森,等. 基于生态理念的土地利用总体规划探讨:以重庆市为例[J]. *资源与产业*, 2011, 13(4): 111-116.
- [5] 郑斌,黄丽娜,卢新海. 论城市土地集约利用中的全面可持续观[J]. *中国土地科学*, 2010, 24(3): 75-80.
- [6] 梁红梅,刘卫东,刘会平,等. 深圳市土地利用社会经济效益与生态环境效益的耦合关系研究[J]. *地理科学*, 2008, 28(5): 636-641.
- [7] 梁红梅,刘卫东,刘会平,等. 土地利用社会效益与生态环境效益的耦合关系:以深圳市和宁波市为例[J]. *中国土地科学*, 2008, 22(2): 42-48.
- [8] 钟全林,谢利玉. 生态公益林类型及效益评价指标体系研究[J]. *江西农业大学学报*, 1999, 21(1): 103-106.
- [9] 于丽娟. 双流县土地利用效益评价研究[D]. 四川雅安:四川农业大学, 2006.
- [10] 向海霞,王力,陈引. 城市边缘区土地利用与生态环境建设[J]. *资源与产业*, 2008, 10(1): 28-30.
- [11] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [12] 贺燕,李华. 城市土地集约利用研究[J]. *伊犁师范学院学报*, 2005(3): 107-109.
- [13] 杨静. 保定市土地利用效益评价研究[D]. 河北保定:河北农业大学, 2006.
- [14] 陶金. 武安市可持续发展综合评价及预警研究[D]. 北京:中国地质大学, 2009.
- [15] 王伟娜,宋戈,孙丽娜. 哈尔滨市土地利用效益耦合关系研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 116-120.
- [30] 顾峰雪,潘晓玲,潘伯荣,等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被土壤肥力变化[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1179-1188.
- [31] 徐阳春,沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C, N, P 含量与分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(5): 1-7.