

子午岭林区典型植被下土壤结构及稳定性指标分析

梁向锋^{1,3}, 赵世伟^{1,2}, 华娟^{1,3}, 张扬^{1,3}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 运用分形理论, 研究了子午岭林区 5 种天然次生植被(以 6 a 天然恢复弃耕地为对照)下土壤结构特征, 分析了土壤水稳性团聚体分维、孔隙分维、平均重量直径等 3 个指标在描述土壤结构稳定性方面的差异。研究表明, 相对于弃耕地, 各个植被群落均能明显改善土壤结构, 降低土壤水稳性团聚体分形维数, 提高孔隙分形维数, 增强土壤结构的稳定性。土壤水稳性团聚体分维、孔隙分维与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、土壤有机碳、容重的相关系数均达到了极显著水平, 均能作为评价土壤结构稳定性的指标; 而团聚体平均重量直径与土壤有机碳含量、容重相关性不显著, 只与 >5 mm 团聚体含量和 >0.25 mm 团聚体含量有极显著正相关关系, 因此, 仅可作为大团聚体含量的评价指标。

关键词: 土壤结构; 稳定性指标分析; 子午岭林区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)03-0012-05

中图分类号: S152.4

Analysis of Soil Structure and Its Stability Indexes Under Typical Vegetation in Ziwuling Forest Area

LIANG Xiang-feng^{1,3}, ZHAO Shi-wei^{1,2}, HUA Juan^{1,3}, ZHANG Yang^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the fractal theory, soil fractal features of five types of vegetation in the Ziwuling forest area were studied on contrast to the 6-year abandoned farmland. Results show that the aggregate fractal dimension, the pore fractal dimension, and the mean weight diameter of aggregates can indicate soil structure stability. The aggregate fractal dimension and pore fractal dimension are highly correlated to the content of >0.25 mm aggregates, the content of soil organic carbon, and soil bulk density. So they can be used as the indexes to evaluate soil structure stability. The mean weight diameter does not have significant correlations with the content of soil organic carbon and soil bulk density and however, it has significantly positive correlations with the content of >0.25 mm aggregate and the content of >5 mm aggregates. The mean weight diameter can only be used as the index to evaluate the content of large soil aggregates. As contrasted to the abandoned farmland, soil structure is improved under other four types of vegetation.

Keywords: soil structure; stability index analysis; Ziwuling forest area

土壤的结构直接影响着土壤通气、透水性^[1], 土壤水稳性团聚体的数量和分布特征反映了土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力^[2]。对土壤结构体进行定量的描述, 传统的指标有团聚状况、团聚度、分散度、 >0.25 mm 团聚体含量及 Van Bavel^[3] 提出的团聚体平均重量直径(mean weight diameter)等。

从 20 世纪 80 年代起, 分形理论应用于土壤研究, 使定量描述土壤结构的复杂性质成为可能。杨培岭^[4] 等用土壤颗粒的质量分布代替数量分布, 推导出土壤粒径分布的分维方程, 于是粒径的质量分布用来描述土壤颗粒组成分维和团粒组成的分维。同时, 应用分形理论研究水力特性参数成为另一个研究领域,

收稿日期: 2007-12-25

修回日期: 2008-03-29

资助项目: 国家“十一·五”科技支撑计划课题(2006BCA01A07; 2006BAD09B08)

作者简介: 梁向锋(1982—), 女(汉族), 河南省许昌市人, 在读硕士, 研究方向为植被恢复的土壤环境效应。E-mail: liangxiangf05@mails.gucas.ac.cn。

通信作者: 赵世伟(1962—), 男(汉族), 四川省荣县人, 研究员, 主要从事土壤、植被互动关系研究。E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn。

孔隙分布分形维数作为其中的一个重要参数被广泛应用。黄冠华等^[5]基于 Menger 海绵结构,推导出了反映土壤孔隙结构的水分特征曲线模型。目前应用孔隙分维评价土壤结构的研究还不多见^[6]。

由于母岩、气候、地形、植被和生物等的不同,导致土壤性质存在差异。在不同的空间尺度上,影响土壤特性的因子不同。在较大空间尺度上地质历史、母岩、气候、地形等是主要因子,在较小尺度上,主要受植被分布、微立地及干扰的影响。植被的演替过程也就是植被与土壤相互作用的过程。子午岭林区具有完备的植被演替序列,相应的植被演替和发育也影响到了土壤结构体的形成和稳定性的改善。近年来对于该区土壤结构演变也有一些报道^[7-8],但对于这3个指标在描述次生植被条件下土壤结构稳定性差异的分析方面鲜见报道。本文根据子午岭林区5种典型植被,研究了土壤结构特征以及3个表征其稳定性的指标差异,以期为黄土高原次生植被恢复条件下土壤结构稳定性的评价提供一些参考。

1 研究区概况

研究区位于黄土高原子午岭北部甘肃省合水县连家砭林场,属于黄土高原丘陵沟壑区,海拔1200~1600 m,为半干旱季风气候。25 a 平均气温7.4℃,年平均降雨量587.6 mm,年平均相对湿度63%~68%,干燥度0.97。土壤为原生(山坡)或次生(沟谷)黄土,厚度一般为50~100 m,其下为80~100 m的红土。子午岭北部植被是在1866年当地人口外迁后,在弃耕地的基础上恢复起来的天然次生林,具有完整的植被演替序列,其主要森林群系有油松林、辽东栎林、山杨林和白桦林等,还有辽东栎林与白桦、山杨、油松等的混交林。其中,辽东栎林为该区的顶级群落^[9]。

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集

在甘肃省合水县连家砭林场,根据植被恢复演替阶段,选择了弃耕地、白羊草草地、沙棘、山杨、辽东栎作为研究样地。以弃耕地为对照,不同植被类型、不同恢复年限的林地、草地与之对比,用于植被恢复后土壤结构变化的研究,样点立地条件见表1。各采样点均设在坡中部,挖深100 cm的土壤剖面,从上向下0—5 cm,5—10 cm,10—30 cm,30—60 cm,60—100 cm共5个层次取样,同时取原状土和环刀样,作室内分析。

表1 样点基本状况

样点	主要植物	恢复年限/a	坡度	坡向
	辽东栎、绣线菊、虎榛子等	150	17°	NE48°
	山杨、茶条漆及辽东栎幼苗等	100	14°	NE18.5°
	沙棘、黄刺梅、萎陵菜等	30	12°	SW53°
	白羊草、芨芨、达乌里胡枝子等	24	8°	SW85°
	达乌里胡枝子、长芒草、茵陈蒿等	6	0°	卯顶

注: 辽东栎 (*Quercus liaotungensis*); 山杨 (*Populus davidiana*); 沙棘 (*Hippophae rhamnoides*); 白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*); 弃耕地。下同。

2.2 土壤性状测定方法

(1) 土壤有机碳:重铬酸钾外加热法。(2) 土壤容重:环刀法。(3) 水稳性团聚体。应用改进的 Yoder 湿筛法测定,即根据黄土特性,事先将土壤湿润30 min,振动时间由30 min改为1 min,粒径分别为: >5 mm,5~2 mm,2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm。(4) 土壤水分特征曲线。离心机法(测定1.0×10⁴ Pa,2.0×10⁴ Pa,4.0×10⁴ Pa,6.0×10⁴ Pa,8.0×10⁴ Pa,1.0×10⁵ Pa,2.0×10⁵ Pa,4.0×10⁵ Pa,6.0×10⁵ Pa,8.0×10⁵ Pa,1.0×10⁶ Pa共11个点的土壤水吸力—土壤含水量数据)。

2.3 土壤分形维数和平均重量直径

2.3.1 团聚体分维 采用杨培岭提出的土壤颗粒组成分形特征模型

$$1 - (\bar{d}_i / \bar{d}_{\max})^{3 \cdot D_{团}} = M_i(\bar{d}_i) / m_0 \quad (1)$$

式中: \bar{d}_i ——两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值; \bar{d}_{\max} ——最大粒级土粒的平均直径; $m_i(\bar{d}_i)$ ——大于 d_i 的累积土粒质量; m_0 ——土壤各粒级质量的总合; $D_{团}$ ——团聚体分形维数,可以通过回归方法求出。

2.3.2 土壤孔隙分布分维 采用黄冠华等推导出的土壤水分特征曲线模型

$$\frac{\theta}{s} = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{D_{孔} \cdot 3} \quad (2)$$

式中: $D_{孔}$ ——孔隙分形维数; θ ——土壤含水率(%); s ——饱和含水率(%); θ_s ——介质的基质吸力(cm); a ——进气吸力(cm)。

根据子午岭林区土壤的机械组成,容积含水率用吕殿青^[10]模型中的安塞壤土进行换算,孔隙分形维数可通过容积含水率与土壤水吸力回归而得。

2.3.3 团聚体平均重量直径 DMW

$$DMW = \sum_{i=1}^{n+1} X_i \times W_i \quad (3)$$

式中: X_i —— i 粒级与 $i+1$ 粒级的平均直径;
 W_i ——该粒级范围内水稳性团聚体的百分含量。

3 结果与分析

3.1 植被恢复对土壤水稳性团聚体分布的影响

没有植被就没有黄土高原,植被的恢复演替过程也是土壤与植被相互作用的过程。很多研究表明,植被的恢复能够提高土壤有机碳含量,增加土壤团聚体含量从而改善土壤结构,并增强其结构稳定性。

由表 2 可知,不同植被不同层次土壤团聚体的分布,以 >5 mm 大团聚体变化最大。土壤大团聚体的形成,除与土壤有机质、黏粒等胶结物质含量有关外,与植物根系的穿插活动和凋落物的类型也有很大关

系。5 种典型植被下随着土层深度的增加, >5 mm 土壤水稳性团聚体含量呈现先增加后下降的趋势,即在 0—5 cm 和 5—10 cm 较高;除辽东栎外,均在 10—30 cm 深度达到剖面上的最高值,山杨、沙棘、白羊草、弃耕地分别为 49.15%, 52.97%, 51.98%, 39.09%;而后在 30—60 cm 土层迅速下降,在 60—100 cm 土层达到最低值 ($<6.27\%$)。

随着植被的恢复, 2—5 mm 和 1—2 mm 团聚体含量增加最为显著。2—5 mm 团聚体含量辽东栎最高, 0—5 cm, 5—10 cm, 10—30 cm 这 3 个土层均达到了 21% 以上,山杨 0—5 cm, 5—10 cm 土层在 17%~18% 之间,白羊草在 14%~17% 之间,沙棘、弃耕地含量最低,在整个剖面上其含量均在 10.69% 以下。1—2 mm 团聚体含量在辽东栎表层最高为 26.70%。0.5—1 mm, 0.25—0.5 mm 粒级的团聚体含量在各个植被间变化不大。

表 2 不同植被土壤团聚体分布

样点	土层深度/cm	不同粒径土壤团聚体含量/%					
		>5 mm	2—5 mm	1—2 mm	0.5—1 mm	0.25—0.5 mm	
	0—5	14.56	21.06	26.70	10.24	7.10	79.66
	5—10	31.94	24.85	7.87	7.59	6.59	78.84
	10—30	24.80	21.29	11.37	6.51	5.99	69.96
	30—60	37.31	8.33	7.30	6.84	6.70	66.48
	60—100	8.84	4.62	7.32	9.63	10.81	41.22
	0—5	37.92	18.01	11.38	8.88	9.71	85.91
	5—10	32.65	17.58	12.19	9.55	9.17	81.13
	10—30	49.15	8.67	6.71	5.68	5.18	75.39
	30—60	16.11	10.02	13.29	9.78	8.66	57.85
	60—100	5.62	9.46	13.51	13.82	14.39	56.79
	0—5	12.00	10.69	17.15	14.20	12.18	66.21
	5—10	38.83	9.68	10.09	7.89	6.84	73.32
	10—30	52.97	6.55	6.82	5.31	4.24	75.88
	30—60	10.10	8.77	10.55	10.68	9.69	49.78
	60—100	4.94	5.94	9.08	11.08	12.02	43.07
	0—5	44.60	16.32	10.68	7.49	4.94	84.04
	5—10	41.15	14.86	10.64	7.81	5.32	79.77
	10—30	51.98	9.57	7.84	6.15	4.35	79.88
	30—60	14.09	8.19	9.82	10.71	9.11	51.92
	60—100	2.78	6.23	11.89	15.28	16.09	52.28
	0—5	45.29	9.28	5.96	5.78	4.41	70.73
	5—10	32.79	9.97	10.25	8.01	6.72	67.73
	10—30	39.09	10.31	8.42	6.85	5.45	70.12
	30—60	5.33	7.48	12.28	12.28	10.81	48.18
	60—100	4.41	3.53	4.81	8.36	10.80	31.92

一般认为 >0.25 mm 水稳性团聚体的数量与土壤结构稳定性及肥力状况呈正相关^[11]。由表 2 可

见, >0.25 mm 团聚体含量均随着土层深度的增加而降低。0—5 cm, 5—10 cm 土层, 辽东栎、山杨、白

羊草 > 0.25 mm 团聚体含量均在 80% 左右,而沙棘、弃耕地则明显低于以上 3 种植被。山杨、白羊草 60—100 cm 土层 > 0.25 mm 含量大于 50%,辽东栎、沙棘分别为 41.22%, 43.07%, 弃耕地最低为 31.92%。> 0.25 mm 团聚体在不同植被下的差异与有机碳累计和植物根系活动密切相关,根系活跃层深的土壤就能够在较深层次形成良好的结构体。

3.2 水稳性团聚体平均重量直径 MWD

不同粒级团聚体对土壤养分的保持和供应、孔隙组成、水力性质和生物运动具有不同的作用,因此,在团聚体总量的基础上,团聚体大小分布状况与土壤质量关系更为密切。MWD 越大表明土壤团聚度越高,稳定性越强^[12]。

由图 1 可知,土壤团聚体平均重量直径表层白羊草、弃耕地、山杨较高,分别为 4.17 mm, 4.18 mm, 3.77 mm, 辽东栎 2.36 mm 居中,沙棘 1.71 mm 最低; 5—10 cm 土层,白羊草、弃耕地、山杨均较其表层 Dmw 有所降低; 白羊草、沙棘、山杨均在 10—30 cm 土层达到其剖面上的最高值。30—60 cm 土层 5 种植被下均有下降,在 60—100 cm 达到其剖面最低值。

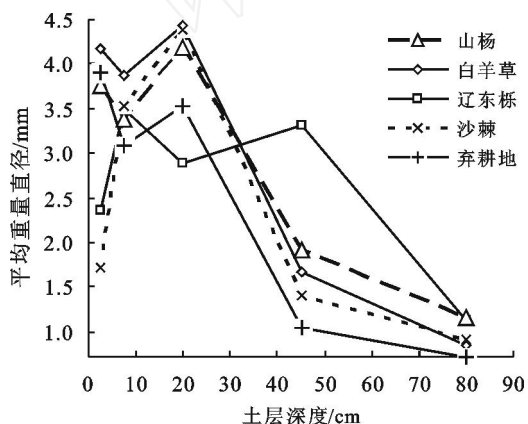


图 1 不同植被下土壤团聚体平均重量直径在剖面上的变化

3.3 土壤分形特征

3.3.1 土壤孔隙分形维数 土壤孔隙分形维数越大,孔隙越均匀,连通性越好。图 2A 表明,5 种植被下土壤孔隙分形维数在 2.77~2.88 之间,说明子午岭林区土壤具有良好的孔隙分布。表层辽东栎最大 2.87,其次是山杨 2.86,白羊草 2.83,沙棘 2.81,弃耕地最低,为 2.77。随着土层深度的增加,孔隙分形维数($D_{孔}$)减小。弃耕地、山杨、沙棘在 30—60 cm 土层有一拐点,在该层次达到土壤剖面的最低值。辽东栎、白羊草则在 60—100 cm 层次达到剖面的最低值。

已有研究表明,植被恢复至森林后,由于植物凋落物及根系活动,土壤容重减小,有机碳含量增加,从

而具有良好的通气透水性能。草、灌、乔植被下土壤孔隙分形维数均较弃耕地有所提高,说明植被恢复的草、灌、乔各阶段均能改善土壤孔隙状况。

3.3.2 土壤水稳性团聚体分形维数 土壤团聚体分形维数反映了土壤团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响,即团聚体分维越小,土壤越具有良好的结构与稳定性。由图 2B 可知,土壤水稳性团聚体分形维数在 2.53~2.91 之间变化,较孔隙分维变化更大,但表征的土壤结构规律是一致的。0—5 cm 土层土壤水稳性团聚体分形维数山杨(2.53) < 白羊草(2.56) < 辽东栎(2.58) < 沙棘(2.73)、弃耕地(2.73), 5—10 cm 的值较 0—5 cm 为小,其趋势一致。随着土层深度的增加,水稳性团聚体分形维数均有不断增大的趋势。

由于人为的耕作扰动致,短期弃耕,弃耕地表层 0—5 cm 和 5—10 cm 难以形成稳定的团聚体结构。各植被下土壤结构从土壤孔隙分维和水稳性团聚体分维的角度分析,其结构均明显好于弃耕地,说明子午岭林区的植被恢复有利于土壤结构稳定性的提高,促进了土壤结构的改善。土壤孔隙分维和土壤团聚体分维有着一定的共性,可以得到相同的结论:辽东栎、山杨、白羊草的土壤结构较好,而沙棘、弃耕地的结构较差。

3.4 土壤结构稳定性指标分析

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其结合状态构成了土壤结构。植被恢复过程是与土壤相互作用的过程。很多研究业已证明,植被恢复能够提高土壤结构稳定性。有机碳含量是影响土壤团聚体稳定性的一个重要因素,土壤容重表明了土壤孔隙状况,二者(见表 3)与土壤结构稳定性直接相关,> 0.25 mm 水稳性团聚体含量是评价土壤结构稳定性的常用指标并与土壤有机碳含量正相关。上述 3 个因素均能对植被恢复条件下土壤结构稳定性产生直接影响,采用这 3 个因素与土壤孔隙分维、水稳性团聚体分维及 DMW 进行相关性分析(见表 4),可反映出土壤孔隙分形维数、水稳性团聚体分形维数及 DMW 在评价土壤结构稳定性方面的差异。

由表 4 知,表征土壤结构的 3 个指标侧重点不同,从不同方面说明土壤结构稳定性。从土壤剖面的整体情况来看,3 个土壤结构指标均能反映土壤结构稳定性,即弃耕地、沙棘土壤结构稳定性最差,辽东栎、山杨最好,白羊草土壤结构稳定性居中。在描述表层 0—5 cm 和 10—30 cm 土壤结构时,DMW 不尽合理,表现了与另外两个指标不同的结果。

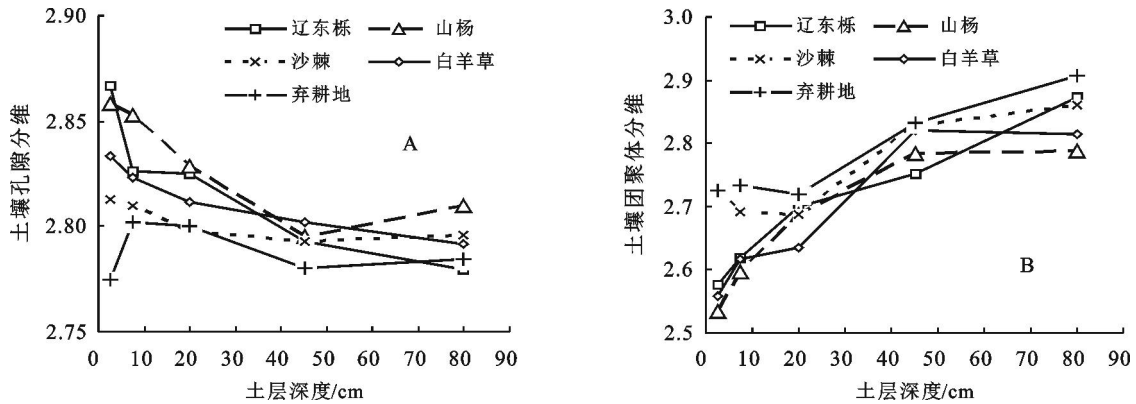


图 2 不同植被下土壤分形维数在剖面的变化

表 3 不同植被下土壤有机碳含量和土壤容重

土层深度/ cm	土壤有机碳含量 SOC/ (g · kg ⁻¹)					容重/ (g · cm ⁻³)				
0—5	30.05	42.62	24.85	16.86	12.36	0.89	0.75	0.92	1.14	1.29
5—10	15.60	25.64	14.58	14.13	10.92	1.02	0.98	1.11	1.24	1.20
10—30	7.26	9.10	9.02	7.79	5.03	1.02	1.13	1.17	1.22	1.18
30—60	3.77	4.55	2.77	3.60	2.37	1.23	1.25	1.28	1.21	1.33
60—100	2.83	3.26	2.67	2.79	2.78	1.21	1.23	1.31	1.29	1.30

表 4 土壤结构指标与土壤性质的回归模型

项目	$D_{孔}$		$D_{团}$		MWD	
>0.25 mm 团聚体含量	$y=0.0011x+2.74$	$R=0.73^{**}$	$y=-0.0067x+3.16$	$R=-0.97^{**}$	$y=0.077x-2.35$	$R=0.88^{**}$
SOC/ (g · kg ⁻¹)	$y=0.0019x+2.79$	$R=0.80^{**}$	$y=-0.0079x+2.81$	$R=-0.79^{**}$	$y=0.052x+2.11$	$R=0.41^{*}$
容重/ (g · cm ⁻³)	$y=-0.14x+2.97$	$R=-0.84^{**}$	$y=0.49x+2.15$	$R=0.72^{**}$	$y=-2.88x+6.01$	$R=-0.34$
>5 mm 团聚体含量/ %	$y=0.0004x+2.80$	$R=0.29$	$y=-0.0042x+2.83$	$R=-0.69^{**}$	$y=0.074x+0.72$	$R=0.99^{**}$

注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; $n=25$ 。

孔隙分形维数与土壤有机碳含量、土壤容重、>0.25 mm 水稳性团聚体含量呈现极显著相关关系,而与>5 mm 大团聚体含量关系不显著;水稳性团聚体分形维数与土壤有机碳含量、容重及>0.25 mm 团聚体含量、>5 mm 团聚体含量极显著相关。林地、草地、弃耕地均表现为,水稳性团聚体分形维数越小,>0.25mm 的团粒含量越高,土壤容重越小,土壤疏松(孔隙分形维数增大),土壤通气度大,土壤涵养水分与供应植物生长所需水分的能力越好;反之,水稳性团聚体分形维数越大,土壤>0.25 mm 团粒含量越低,土壤容重越大,土壤紧实,通气度小(孔隙分形维数减小),则土壤涵养水分和供应植物需水能力差。这说明土壤孔隙分维和土壤水稳性团聚体分维两个指标不仅能反映出影响土壤结构稳定性主要因子的变化,同时反映了次生植被恢复条件下土壤结构稳定性的变化规律,因此更适合作为土壤结构稳定性

评价的指标。而 MWD 与土壤容重、有机碳含量的相关系数均在 0.5 以下,仅与>0.25 mm, >5 mm 团聚体含量的相关关系均达到了极显著水平。因此,可以作为表征土壤大团聚体含量多少的一个指标。

4 结论

由以上的分析可以得出,从土壤孔隙分形维数和土壤水稳性团聚体分形维数的角度看,按照由弃耕地、沙棘、白羊草、山杨到辽东栎的顺序,土壤孔隙分形维数在整个土壤剖面上都有所提高;而土壤水稳性团聚体分形维数依次降低,说明各个植被群落均能明显改善土壤结构,增强土壤结构的稳定性。因此,土壤孔隙分形维数和水稳性团聚体分形维数能够描述植被恢复对土壤结构稳定性的影响。

(下转第 22 页)

- [15] Xu H L. Effect of Groundwater level on the vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim river [C]// The Proceedings of the China Association for Science and Technology. 2006:2(3):86—93.
- [16] 曾彦军,王彦荣,南志标.阿拉善干旱荒漠区不同植被类型土壤种子库研究[J].应用生态学报,2003,14(9):1457—1466.
- [17] 赵丽娅,李锋瑞.草地沙化过程地上植被与土壤种子库变化特征[J].生态学报,2003,23(9):1745—1756.
- [18] 赵丽娅,李兆华,李锋瑞,等.科尔沁沙地植被恢复演替进程中群落土壤种子库研究[J].生态学报,2005,25(12):3204—3211.
- [19] Ren J, Tao L, Lin X M. Effect of water supply on seed germination of soil seed bank in desert vegetation[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 44(1): 124—126.
- [20] 闫巧玲,刘志民.持久土壤种子库研究综述[J].生态学杂志,2005,22(8):948—952.
- [21] Leck, M A, Leck C F. A ten-year seed bank study of old field succession in central New Jersey[J]. Journal of the Torrey Botanical Society, 1998, 125:11—132.
- [22] Coffin D P, Lauenroth W K. Spatial and temporal variation in the seed bank of a semi-arid grass land[J]. American Journal of Botany, 1989, 6:53—58.
- [23] Yan Q L, Liu Zh M, Zhu J. Structure, pattern and mechanisms of formation of seed banks in sand dune systems in northeastern Inner Mongolia. China [J]. Plant and Soil, 2005, 277:175—184.
- [24] Major J, Pyott W T. Buried viable seeds in temperate forest [C]// White J D (ed). The Population Structure of Vegetation. Dordrecht, the Netherlands: Junle Publishers, 1966, 13:253—282.
- [25] Whipple S A. The relationship of buried, germinating seeds to vegetation in an old-growth Colorado subalpine forest [J]. Canadian Journal of Botany, 1978, 56: 1505—1509.
- [26] Caballero I, Olano J M, Loidi J. Seed bank structure along a semi-arid gypsum gradient in Central Spain [J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(2):287—299.
- [27] Connor T G, Pickett G A. The influence of grazing on seed production and seed bank of some African savanna grasslands [J]. Journal of Applied Ecology, 1992, (29):247—260.
- [28] Thompson K, Grime J P. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats [J]. Journal of Ecology, 1995(6):893—921.

(上接第 16 页)

土壤水稳性团聚体分维、孔隙分维与 $> 0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、土壤有机碳、容重的相关系数均达到了极显著水平,均能作为评价植被恢复土壤结构稳定性的指标;而团聚体平均重量直径与土壤有机碳含量、容重相关性不显著,只与 $> 5 \text{ mm}$ 团聚体含量和 $> 0.25 \text{ mm}$ 团聚体含量有极显著正相关关系,仅可作为大团聚体含量的指标。因此,土壤水稳性团聚体分维、孔隙分维比团聚体平均重量直径更适合作为描述植被恢复下土壤结构稳定性变化的指标。

[参 考 文 献]

- [1] 朱祖祥.土壤学[M].北京:农业出版社,1982.
- [2] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion loess [J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936, 28:337—351.
- [3] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregate as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1949, 14:20—23.
- [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] 黄冠华,詹卫华.土壤水分特性曲线的分形模拟[J].水科学进展,2002,13(1):55—60.
- [6] 王玉杰,王云琦,夏一平,等.重庆缙云山典型林分土壤结构分形特征[J].中国水土保持科学,2006,4(4):39—46.
- [7] 丁文峰,丁登山.黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J].地理研究,2002,21(6):700—706.
- [8] 史衍玺.人为开垦加速侵蚀下土壤质量演变及其机理研究[D].杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所,1998.
- [9] 邹厚远,刘国彬,王晗生.子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J].西北植物学报,2002,22(1):1—8.
- [10] 吕殿青,邵明安,王全九.土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J].水利学报,2003(3):110—115.
- [11] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter. II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64:1042—1049.
- [12] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution [C]// Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 2002: 317—328.