沂蒙山区不同母岩发育土壤物理性质

张永坤[1,2], 吴元芝[1], 于兴修[1,3]

(1. 临沂大学 水土保持与环境保育研究所 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 山东 临沂 276000;
2. 山东师范大学 人口·资源与环境学院, 山东 济南 250014; 3. 湖北大学 资源环境学院, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 以沂蒙山区小圣堂小流域为研究区,对比分析了酸性岩石和钙质岩石发育土壤的物理性质及其影响因素。结果表明:(1) 酸性岩石发育土壤石砾及砂粒含量较高,土壤质地由砂壤质到壤砂质,且随土层深度增加,石砾含量增加。钙质岩石发育土壤粉粒及黏粒含量较高,上下两层的土壤颗粒组成相差不大。受成土母岩影响两种土壤分形维数都很低,且酸性岩石发育土壤的分形维数更低。两种土壤石砾含量均大于 10%,为粗骨土。(2) 酸性岩石发育土壤的容重较大,总孔隙度和毛管孔隙度较小。两种土壤的容重和毛管孔隙度随土层深度的增加而变大,总孔隙度和非毛管孔隙度则反之。毛管孔隙度大小主要受土壤分形维数的影响。(3) 酸性岩石发育土壤的饱和导水率大于钙质岩石发育土壤,酸性岩石发育土壤 10—20 cm 土层的饱和导水率较 0—10 cm 土层大,而钙质岩石发育土壤饱和导水率在不同土层深度呈现不规律的变化。土壤质地是影响沂蒙山区土壤饱和导水率的主导因素,其中,砂粒和粉粒含量的影响尤为明显。

关键词: 沂蒙山区; 酸性岩石; 钙质岩石; 颗粒组成; 饱和导水率; 孔隙度

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2014)05-0034-05 **中图分类号**: 152.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.014

Physical Properties of Soils Developed from Different Parent Rocks in Yimeng Mountainous Region

ZHANG Yong-kun[1,2], WU Yuan-zhi[1], YU Xing-xiu[1,3]

(1. *Institute of Soil and Water Conservation & Environmental Protection, Linyi University/ Shandong Provincial Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Environmental Protection, Linyi, Shandong* 276005, *China*; 2. *College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan, Shandong* 250014, *China*; 3. *College of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan, Hubei* 250014, *China*)

Abstract: A comparative analysis of soil physical properties and their influencing factors was carried out between soils developed from either acidic and calcareous rocks in Xiaoshengtang small watershed in the Yimeng mountainous region. The results showed that: (1) The soils developed from acidic rocks contained more gravel and sand than those from calcareous rocks. Soil textures ranged from sandy loam to loamy sand, and the gravel content increased with soil depth. The silt and clay contents of the soils were slightly higher in soils developed from calcareous rocks than from acidic rocks. However, the particle size compositions of the upper and lower soil layers were similar for soils from the calcareous rocks. Both soil types had relatively low fractal dimensions, which were influenced by the parent rock, but those of the soils developed from acidic rock were lower. Furthermore, they were both poorly developed soils with gravel contents higher than 10%. (2) Soils developed from acidic rock had higher bulk densities than that from calcareous rocks, which had higher total and capillary porosities. The bulk densities and capillary porosities of the two soils increased with increasing soil depth and, conversely, the total porosities and non-capillary porosities decreased. Furthermore, the capillary porosities were mainly influenced by soil fractal dimensions. (3) The saturated hydraulic conductivities of the soils developed from acidic rock were higher than those from calcareous rock, and they were higher in the 10—20 cm soil layer than in the 0—10 cm layer. However, the saturated hydraulic conductivities of the soils developed from calcareous rock did not exhibit consistent changes in different soil

收稿日期:2013-08-12 **修回日期**:2013-10-07

资助项目:国家自然科学基金项目"沂蒙山区典型成土母质土壤的水分有效性和植被的耗水特征"(41101206)

作者简介:张永坤(1987—),男(汉族),山东省临沂市人,硕士研究生,研究方向为土壤水文。E-mail:zhangyongkun321@163.com。

通信作者:吴元芝(1982—),女(汉族),山东省济南市人,博士,讲师,主要从事土壤水文研究。E-mail:wuyuanzhi05@163.com。

layers. Soil texture, especially the sand and silt contents, was the main influencing factor of soil saturated hydraulic conductivity in the Yimeng mountainous region.

Keywords: Yimeng mountainous region; acidic rock; calcareous rock; soil particle size composition; saturated hydraulic conductivity; porosity

成土母质对土壤颗粒组成、容重和有效水含量等土壤物理性质具有重要影响[1-2]。土壤物理性质不仅决定土壤中水、气、热和生物状况,而且影响土壤中植物营养元素的有效性和供应能力[3-5]。不同土壤类型,因其物理性质的差异,对植物生长产生重大影响。以往对不同母岩发育的紫色土和红壤的物理性质研究较多[6-8],而对棕壤与褐土物理性质的研究较少,主要涉及农田棕壤和褐土的持水性和供水性研究[9]、山地棕壤和淋溶褐土的饱和导水率[10],但其并未针对成土母质的影响进行分析,且尤其缺乏山地粗骨性棕壤和褐土的物理性质研究。

沂蒙山区地处鲁中南山地丘陵区,是北方土石山区的典型代表,该区黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、片岩、变质岩(砂石山)与石英岩、板岩、大理岩、页岩、石灰岩、白云岩(青石山)相间分布,形成棕壤和褐土分布复区[11]。由于土壤侵蚀严重,山地丘陵地区多形成褐土性土、棕壤性土、粗骨土(包括酸性粗骨土、钙质粗骨土)。其中酸性岩分布区发育的土壤土层较厚,但结构松散易于流失;石灰岩等钙质岩石分布区发育的土壤细土粒较多、抗蚀性较强,但土层浅薄、石漠化严重。

本研究以沂蒙山区为例,拟通过研究不同母岩土壤物理物质,为酸性岩石和钙质岩石发育土壤物理性质的对比研究提供良好案例,同时为沂蒙山区乃至北方土石山区酸性岩石和钙质岩石分布区的水源涵养林建设、植被合理恢复提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验地设在临沂市平邑县天宝山国家天然林场小圣堂小流域,该流域成土母岩主要有石灰岩、白云岩、花岗岩,且交错分布。在 3 种母岩基础上发育的土壤主要为褐土性土、钙质粗骨土、棕壤性土和酸性粗骨土,土层厚度为约 20 cm,表层土壤夹杂大量石砾,肥力相对较低。该区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 13.7 ℃,多年平均降水量 803.4 mm。土地利用类型以果园和林地为主,果园以桃园为主,林地树种主要包括侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、黑松(*Pinus thunbergii*)等。侧柏林通常生长在石灰岩发育的土壤上,黑松生长在花岗岩发育的粗骨土上,刺槐和桃树在两种母岩发育的土壤上都有分布。因此可以进行不同母质土壤及不同植被条件下土壤物理性质的对比分析。

1.2　样地设置

2012 年 10 月,在研究区内按植被类型、土壤类型等因子选取样地,包括钙质岩石发育土壤的刺槐林地、侧柏林地和果园,酸性岩石发育土壤的刺槐林地、黑松林地和果园。其中林地土壤分上坡、中坡、下坡,并按照土层深度 0—10,10—20 cm 这 2 个层次用环刀分层采集原状土样,并取 3 个重复。果园为梯田,同样按照土层深度 0—10,10—20 cm 这 2 个层次,用环刀分层采集原状土样,同样取 3 个重复。采集原状土样时,用塑封袋采集相应土壤层次的土壤,用于测定土壤颗粒组成。

1.3　研究方法

(1) 土壤颗粒组成分析及分形维数计算。采用筛分法测定 >2 mm 石砾含量,采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定 <2 mm 土壤的颗粒组成,每个土样取 3 个重复,分析前使用双氧水去除有机质,并用超声波震荡分散。根据杨培岭等[12]提出的利用土壤颗粒的重量分布来计算土壤粒径分布的分形维数,其计算公式为

$$D=3-\frac{\lg w(\delta<\overline{d}_i)/w_0}{\lg \overline{d}_i/d_{\max}} \tag{1}$$

式中:D——土壤颗粒表面的分形维数;$w(\delta<\overline{d})$——土粒直径小于 $\overline{d}_i$ 的累积重量;w_0——全部粒级土粒的重量和;$\overline{d}_i$——两筛分粒级 $\overline{d}_i$ 和 $\overline{d}_{i+1}$ 的平均直径;$\overline{d}_{\max}$——最大粒级土粒的平均直径。

(2) 土壤容重测定。采用环刀烘干法测定土壤含水量及容重,环刀体积为 100 cm^3,在 105 ℃烘箱内烘干 24 h 至恒重。然后按照公式(2)计算土壤容重:

$$\rho_b=m_s/v \tag{2}$$

式中:ρ_b——土壤容重(g/cm^3);m_s——干土质量(g);v——环刀体积(cm^3)。

(3) 孔隙度测定与计算。采用环刀浸泡法测定毛管孔隙度、总孔隙度以及非毛管孔隙度等土壤物理性质指标。将采集原状土的底部带有滤纸的环刀先放入烘箱烘干称重,然后放于盛有 2～3 mm 水层的瓷盘中,让土壤毛细管吸水,吸水时间为 12 h,12 h 后每过 1～2 h 称重直至质量不变为止,根据公式(3)

计算出毛管孔隙度；总孔隙度测定时将底部带有滤纸的环刀放入水中，使水位略低于环刀上部，吸水 24 h 后称重，然后每隔 4 h 进行称重，直至质量不变为止，根据公式(4)计算出总孔隙度；非毛管孔隙度则为总孔隙度减去毛管孔隙度的差值。

$$f_a=\frac{m_a-m_s}{v}\cdot d_a\times 100\% \tag{3}$$

式中：f_a——毛管孔隙度(%)；m_a——吸水 12 h 后环刀内湿土质量(g)；m_s——干土质量(g)；v——环刀体积(cm^3)；d_a——土壤容重(g/cm^3)。

$$f_v=\frac{m_v-m_s}{v}\cdot d_a\times 100\% \tag{4}$$

式中：f_v——总孔隙度(%)；m_v——吸水 24 h 的湿土质量(g)。

(4) 采用定水头法测定原状土壤的饱和导水率。将环刀采集的原状土浸泡 24 h 至饱和，用铁架台固定，由马氏瓶提供稳定进水头，测定一定时间的出水量，根据公式(5)计算出饱和导水率。

$$K_S=\frac{V}{tA}\cdot\frac{L}{H} \tag{5}$$

式中：K_S——饱和导水率(mm/min)；V——出水量(cm^3)；L——环刀高度(cm)；H——进水端水头(cm)；A——环刀横截面积(cm^2)；t——出水量对应时间(min)。

2 结果与分析

2.1 不同母岩发育土壤颗粒组成差异

不同成土母质土壤的质地分形维数差异很大[13]，土壤质地不同，其孔隙性、持水性和水力学性质等差异很大，进而对土壤养分和水分的保持产生很大影响[14]。

表 1 显示沂蒙山区酸性岩石和钙质发育土壤的石砾含量及颗粒组成状况。由表 1 可以看出，酸性岩石发育土壤中石砾含量较钙质岩石发育土壤高，在果园、刺槐和黑松 3 种土地类型中石砾含量质量百分数均大于 20%，其中黑松林中石砾含量最高，果园中石砾含量最低；钙质岩石发育土壤的石砾含量在 8%～20%，林地土壤石砾含量酸性岩石发育土壤较钙质岩石发育土壤多 1 倍以上。酸性岩石发育土壤 10—20 与 0—10 cm 土层相比，其中＞2 mm 的砾石明显增多；与酸性岩石发育土壤相比，钙质岩石发育土壤上下两层的土壤颗粒组成差异不大，这是由于酸性岩石发育土壤较钙质岩石发育土壤，其发育程度较弱。因两种土壤石砾含量均＞10%，两种土壤为粗骨土，分别为钙质和酸性粗骨土。

就土壤颗粒组成而言，酸性岩石发育土壤中的砂粒含量高于钙质岩石发育的土壤，钙质岩石发育土壤中的粉粒和黏粒含量高于酸性岩石发育的土壤。土壤质地明显不同，钙质岩石发育土壤质地较酸性岩石好，刺槐和侧柏林钙质岩石发育土壤的土壤质地为粉壤土，果园钙质岩石发育土壤的质地为砂壤土，酸性岩石发育土壤的土壤质地从砂壤质到壤砂质。酸性与钙质岩石发育土壤的黏粒含量较低，分形维数多在 1.56～2.10 变动(表 1)。已有研究中，土壤颗粒分形维数多在 2.5～2.9[15-17] 之间，干旱沙漠地区植被恢复过程中土壤分形维数由 1.52 增加到 2.29[12]，红壤丘陵区成土母质对土壤颗粒的分形维数影响较大[18]。因此，该区分土壤颗粒组成分形维数数值明显偏低，而土地利用类型相同条件下酸性岩石发育土壤的分形维数更低，这说明土壤颗粒分形维数大小与该区成土母岩的矿物组成有关。

表 1 不同母岩发育土壤石砾含量及颗粒组成比较

基岩类型	植被	土层深度/cm	土壤亚类	＞2 mm 石砾/%	颗粒组成			分形维数(D)	决定系数 R^2	土壤质地(美国制)
					砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%			
钙质岩石	刺槐	0—10	褐土性土	8.06	31.74	65.81	2.45	2.100	0.973 4	粉壤土
		10—20	钙质粗骨土	11.23	34.31	63.23	2.46	2.104	0.976 6	粉壤土
钙质岩石	侧柏	0—10	钙质粗骨土	17.24	41.09	57.13	1.78	2.031	0.981 5	粉壤土
		10—20	钙质粗骨土	19.92	43.46	54.50	2.04	2.066	0.985 3	粉壤土
酸性岩石	刺槐	0—10	酸性粗骨土	31.40	60.93	38.84	0.23	1.547	0.987 2	砂壤土
		10—20	酸性粗骨土	61.60	79.29	20.01	0.20	1.558	0.999 9	壤砂土
酸性岩石	黑松	0—10	酸性粗骨土	47.09	70.27	29.32	0.41	1.711	0.997 9	壤砂土
		10—20	酸性粗骨土	51.25	67.90	31.71	0.39	1.693	0.996 1	砂壤土
钙质岩石	果园	0—10	钙质粗骨土	19.88	63.35	36.19	0.46	1.725	0.993 4	砂壤土
		10—20	钙质粗骨土	14.46	51.45	47.75	0.80	1.844	0.986 1	砂壤土
酸性岩石	果园	0—10	酸性粗骨土	22.36	62.98	36.59	0.43	1.708	0.992 7	砂壤土
		10—20	酸性粗骨土	29.08	66.91	32.70	0.39	1.691	0.995 4	砂壤土

2.2　不同母岩发育土壤的容重和孔隙度差异

土壤容重与孔隙度直接影响到土壤通气透水性和根系穿插的难易程度,对土壤水、肥、气、热和微生物活性等发挥着不同的调节作用,是表征土壤结构的重要指标之一[19-20]。

由表 2 可知,酸性岩石发育土壤的容重较大,均值为 1.43 g/cm^3,比钙质岩石发育土壤高 23%;钙质岩石发育土壤总孔隙度较大,均值为 51%,比酸性岩石发育土壤高 28%,且其毛管孔隙度也多大于酸性岩石发育的土壤。酸性岩石和钙质岩石发育土壤的非毛管孔隙度在 8.05%～17.92%,毛管和非毛管孔隙度的比值在 1.06～5.43。已有研究表明,若非毛管孔隙度在 6%～10%时,不利于林木生长;在 10%～15%时,林木生长中等;大于 15%时,林木生长良好[21];若总孔隙度在 50%左右,毛管和非毛管孔隙度的比值在 1.5～4.1 时,透水性、通气性和持水能力比较协调[22]。因此说明酸性岩石和钙质岩石发育的土壤具有较好的通气透水性,相对适于林木生长。

表 2　不同母岩发育土壤的容重和孔隙度比较

基岩类型	植被	土层深度/cm	容重/(g·cm^{-3})	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	毛管/非毛管孔隙比
酸性岩石	刺槐	0—10	1.35±0.10	40.87±2.7	27.05±1.4	13.82±3.4	1.96
		10—20	1.58±0.07	37.67±1.1	26.82±1.2	10.86±0.6	2.47
钙质岩石	刺槐	0—10	1.08±0.05	53.53±1.1	38.29±2.0	15.23±3.0	2.51
		10—20	1.19±0.13	51.73±5.1	43.69±5.3	8.05±2.9	5.43
酸性岩石	黑松	0—10	1.32±0.12	36.88±2.1	18.95±1.6	17.92±0.9	1.06
		10—20	1.53±0.09	36.41±6.2	25.95±2.4	10.46±2.6	2.48
钙质岩石	侧柏	0—10	1.06±0.04	54.12±5.7	40.65±4.7	13.46±0.5	3.02
		10—20	1.12±0.01	53.26±8	42.15±0.3	11.11±2.7	3.79
酸性岩石	果园	0—10	1.39±0.09	46.29±5.9	31.98±3.5	14.31±1.7	2.24
		10—20	1.43±0.09	39.58±3	24.45±2.5	15.12±0.6	1.62
钙质岩石	果园	0—10	1.24±0.02	45.37±3.1	35.76±2.2	9.61±1.2	3.72
		10—20	1.32±0.10	45.38±4.9	37.02±3.1	8.36±1.8	4.43

随土层深度的增加,酸性与钙质岩石发育土壤的容重有增大趋势,总孔隙度和非毛管孔隙度降低,毛管孔隙度逐渐增大。前者由于表层土壤受到森林凋落物、树根以及依存于森林植被下特殊生物群的影响,有机质和腐殖质富集,随着土层的加深,其含量逐渐减少,后者可能与土壤的颗粒组成有关。

粒径是毛管孔隙度的决定因素[23]。研究表明土壤粒径分布的分形维数可以综合反映土壤粒径大小的影响[24]。本研究中相关分析表明,土壤毛管孔隙度与石砾和砂粒呈极显著负相关,与粉粒和黏粒呈极显著正相关,相关系数分别为 −0.77,−0.74,0.74 和 0.71($p<0.01$);而其与分形维数也呈极显著正相关($R^2=0.844$,$p<0.01$),表明土壤颗粒分形维数对毛管孔隙度的影响明显,且随土层加深,分形维数增大,毛管孔隙度增大。

就 0—10 cm 土层而言,果园容重高于林地,可能由果园人类活动的压实作用引起。未经扰动的同一土壤类型的同一土层中,刺槐、侧柏和黑松的容重和孔隙度状况基本一致,表明刺槐、侧柏和黑松对酸性岩石与钙质岩石发育土壤容重和孔隙度的影响大致相等。

2.3　不同母岩发育土壤导水性能差异

土壤饱和导水率可以很好反映土壤入渗特征[25],它与土壤质地、容重和孔隙度等因素有关[26-27],并间接影响植物的生长[28]。

由图 1 并通过方差分析可知,母岩对其发育土壤的饱和导水率影响明显($p=0.08<0.1$),酸性岩石发育土壤的饱和导水率多大于钙质岩石发育的土壤;0—10 cm 土层表现尤为明显。土壤层次对土壤饱和导水率没有显著影响($p=0.56>0.1$);对于酸性岩石发育土壤,土壤层次对土壤饱和导水率影响明显($p=0.086<0.1$),0—10 cm 土层的饱和导水率小于 10—20 cm 土层。

通过对土壤饱和导水率及其影响因素的相关分析可知,土壤质地对土壤饱和导水率的影响明显。在各个土壤粒级中,粉粒和黏粒含量与土壤饱和导水率呈显著负相关,相关系数分别为 −0.876 和 −0.771($p<0.01$),而>2 mm 的石砾含量和砂粒则与饱和导水率显著正相关,相关系系数为 0.714 和 0.871($p<0.01$)。由此可知,粉粒和黏粒含量提高,使土壤饱和导水率降低,即降低土壤的入渗性能,进而有利于

提高沂蒙山区薄层粗骨土的持水性能，石砾和砂粒则反之。

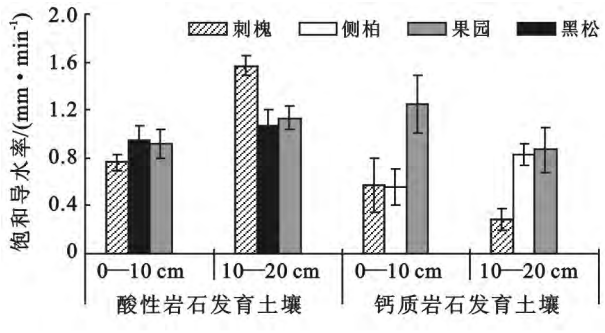


图 1 不同母岩发育土壤的饱和导水率比较

土壤饱和导水率和土壤分形维数呈负相关（$R^2=0.75$，$p<0.05$），这导致酸性岩石发育土壤的饱和导水率明显大于钙质岩石发育土壤，其中 10—20 cm 土层尤为显著。果园中钙质岩石发育土壤 0—10 cm 土层的饱和导水率较 10—20 cm 高，也是因为 0—10 cm 土层中石砾和砂粒含量高。根据相关性大小，可以确定粉粒和砂粒含量对两种土壤饱和导水率的影响最为显著，这主要与两种颗粒含量较多有关。

3 结 论

（1）酸性岩石发育土壤的石砾及砂粒含量较钙质岩石发育的土壤高，且土壤质地由砂壤质到壤砂质，并随土层深度增加，石砾含量增加，相同的土地利用类型条件下，其分形维数低于钙质岩石发育的土壤。与酸性岩石发育的土壤相比，钙质岩石发育土壤的粉粒及黏粒含量多高于酸性岩石发育的土壤，上下两层的土壤颗粒组成相差不大。受成土母岩影响，两种土壤分形维数极低，且酸性岩石发育土壤分形维数更低。两种土壤石砾含量均＞10%，为粗骨土。

（2）酸性岩石发育土壤的容重较大，钙质岩石发育土壤的总孔隙度和毛管孔隙度均大于酸性岩石发育的土壤。酸性岩石和钙质岩石发育土壤的容重和毛管孔隙度随土层深度的增加而变大，总孔隙度和非毛管孔隙度则反之。毛管孔隙度大小主要受土壤分形维数的影响。

（3）酸性岩石发育土壤的饱和导水率大于钙质岩石发育土壤，酸性岩石发育土壤 10—20 cm 土层的饱和导水率较 0—10 cm 土层大，而钙质岩石发育土壤饱和导水率在不同土层深度呈现不规律的变化。土壤饱和导水率的大小主要受砂粒和粉粒含量影响。

[参 考 文 献]

[1] Olowolafe E A. Soil parent materials and soil properties in two separate catchment areas on the Jos Plateau, Nigeria [J]. GeoJournal, 2002,56(3):201-212.

[2] Kooijman A M, Jongejans J, Sevink J. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in NE Spain [J]. Catena, 2005,59(1):55-68.

[3] Arshad M A, Lowery B, Grossman B. Physical tests for monitoring soil quality Doran J W, Jones A J. Methods for Assessing Soil Quality [M]// Soil Science Society of America Publication, Madison, Wisconsin, USA, 1996: 123-141.

[4] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators [J]. Catena, 2001,44(5): 47-67.

[5] Karlen D L, Stott D E. A frame work for evaluating physical and chemical indicators of soil qualit [M]// Dorman J W, Coleman D F, Bezdicek F. et al. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment Soil Science Society of American Publication, No 35. Madison, Wisconsin, USA, 1994:53-72.

[6] 董玲玲，何腾兵，刘元生，等. 喀斯特山区不同母质（岩）发育的土壤主要理化性质差异性分析[J]. 土壤通报，2008,39(3):471-474.

[7] 骆东奇，侯春霞，魏朝富，等. 不同母质发育紫色土团粒结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报，2003,17(1): 131-133,182.

[8] 李成亮，何园球，熊又升，等. 四种不同母质发育的红壤水分状况研究[J]. 土壤，2004,36(3):310-317.

[9] 依艳丽，冯永军，刘孝义. 棕壤和褐土的持水性和供水能力[J]. 土壤，1995,27(6):290-294.

[10] 马履一，翟明普，王勇. 京西山地棕壤和淋溶褐土饱和导水率的分析[J]. 林业科学，1999,35(3):109-112.

[11] 山东省土壤肥料工作站. 山东省山地丘陵区土壤[M]. 济南：山东科学技术出版社，1986:38-39.

[12] 贾晓红，李新荣，李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究，2007,26(3):520-524.

[13] 邵明安，王全九，黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京：高等教育出版社，2006:19-23.

[14] 李德成，张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J]. 土壤与环境，2000,9(4):263-265.

[15] 黄冠华，詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报，2002,39(4):490-497.

[16] 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.

[17] 伏耀龙，张兴昌，王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报，2012,28(5): 120-125.

（下转第 43 页）

ganic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites[J]. Microbial Ecology, 1988, 15(2):177-188.

[6] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤微生物量碳的变化及其与土壤理化因子的关系[J]. 生态环境学报,2013,22(1):25-30.

[7] 杨宁,邹冬生,李建国,等. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落自然恢复演替进程中种群生态位动态[J]. 水土保持通报,2010,30(4):87-93.

[8] 张继义,赵哈林,张铜会,等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报,2004,28(1):86-92.

[9] 杨宁,陈璟,杨满元,等. 贵州雷公山秃杉林不同林冠环境下箭竹分株种群结构特征[J]. 西北植物学报,2013,33(11):2326-2331.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.

[11] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987,19(6):703-707.

[12] 杨宁,邹冬生,李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地土壤水分变化动态研究[J]. 水土保持研究,2009,16(6):16-21.

[13] Bath E. Effects of heavy metals in soil on microbial processes and populations (a review)[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1989,47(3/4):335-379.

[14] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration[J]. European Journal of Soil Science, 2003,54(4):801-808.

[15] 刘爽,王传宽. 五种温带森林土壤微生物微生物量碳氮的时空格局[J]. 生态学报,2010,30(12):3135-3143.

[16] 王国兵,阮宏华,唐燕飞,等. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节变化[J]. 应用生态学报,2008,19(1):37-42.

[17] Jia Guomei, Cao Jing, Wang Chunyang, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession of secondary forest succession in Ziwulin, Northwest China[J]. Forest Ecology and Management, 2005,217(1):117-125.

[18] 易志刚,蚁伟民,丁明懋,等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳、微生物生物量碳和土壤 CO_2 浓度垂直分布[J]. 生态环境,2006,15(3):611-615.

[19] 尉海东,董彬. 鲁东南杨树人工林土壤微生物生物量碳的时空动态[J]. 生态环境学报,2013,22(2):233-238.

[20] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变[J]. 生态学报,2014,34(10):2693-2701.

[21] 杨宁,杨满元,雷玉兰,等. 衡阳紫色土丘陵坡地土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 生态环境学报,2014,23(4):575-580.

[22] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析[J]. 农业现代化研究,2012,33(6):757-761.

[23] 鹿士杨,彭晚霞,宋同清,等. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性[J]. 生态学报,2012,32(8):2390-2399.

[24] 杨宁,邹冬生,李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植被恢复模式建设[J]. 草业科学,2010,27(10):10-16.

(上接第 38 页)

[18] 程先富,史学正,王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[J]. 地理科学,2003,23(5):617-621.

[19] 杨弘,李忠,裴铁璠,等. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性质[J]. 应用生态学报,2007,18(2):272-276.

[20] Putuhena W M, Cordery I. Estimation of interception capacity of the forest floor [J]. Journal Hydrology, 1996,180(1):283-299.

[21] 叶仲节,柴锡周. 浙江林业土壤[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,1986:77-103.

[22] 田大伦, 陈书军. 樟树人工林土壤水分—物理性质特征分析[J]. 中南林学院学报,2005,34(2):1-6.

[23] 杨建,陈家军,杨周喜,等. 松散砂粒孔隙结构、孔隙分形特征及渗透率研究[J]. 水文地质工程地质,2008,35(3):93-98.

[24] 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):1896-1896.

[25] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(3):53-56.

[26] 王贤,张洪江,程金花,等. 重庆市四面山典型林分土壤饱和导水率研究[J]. 水土保持通报,2012,32(2):29-34.

[27] 丁小龙,张兴昌,窦晶晶,等. EN-1 固化剂对 4 种土壤饱和导水率的影响研究[J]. 水土保持通报,2012,32(1):132-134.

[28] 贾小旭,邵明安,魏孝荣,等. 黄土高原北部草地表层土壤水分状态空间模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(10):38-44.