

子午岭次生林区土壤持水力及其与土壤有机碳的关系*

梁向锋^{1,4}, 赵世伟^{1,2}, 张亚莉³, 赵勇钢¹, 华娟^{1,4}, 张扬^{1,4}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨陵 712100; 3. 陕西省黄陵县林业工作站, 陕西 黄陵 727300; 4. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:通过野外调查和室内分析,就子午岭次生植被辽东栎、山杨、沙棘、狼牙刺、白羊草的土壤持水力及其与土壤有机碳含量的关系进行研究。结果表明, 植被间土壤持水力为:辽东栎 > 山杨 > 狼牙刺 > 白羊草 > 沙棘,除沙棘外,各植被土壤持水力和供水力随植被的正向演替而提高。土壤比水容量即释水能力表现为乔木林大于灌木林和草地。土壤水分特征曲线 Gardner 模型参数 A、土壤有效水、土壤无效水含量与土壤有机碳含量有很好的相关性,相关系数分别达到 0.83, 0.80, 0.79。

关键词:土壤持水力; 土壤有效水; 子午岭次生林区

中图分类号: S152.71; S153.61

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)03-0015-05

Soil Water Holding Capacity and Its Relationship to Soil Organic Carbon in Ziwuling Secondary Forest Region

LIANG Xiang-feng^{1,4}, ZHAO Shi-wei^{1,2}, ZHANG Ya-li³, ZHAO Yong-gang¹, HUA Juan^{1,4}, ZHANG Yang^{1,4}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Forestry Station in Huangling County of Shaanxi Province, Huangling, Shaanxi 727300, China; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, soil water holding ability and its relationship to soil organic carbon under five different Ziwuling secondary vegetations (*Quercus liaotungensis*, *Populus davidiana*, Seabuckthorn, *Sophora viciifolia*, *Bothriochloa ischaemum*) were studied by means of laboratory research and field vegetation survey. The results were as follows: Among the five vegetations the soil water holding capacity had the following order: *Quercus liaotungensis* > *Populus davidiana* > *Sophora viciifolia* > *Bothriochloa ischaemum* > Seabuckthorn. Soil water holding capacity improved with vegetation succession except for Seabuckthorn.

The specific water capacity of soil showed as tree > shrub > grass. The parameter A, soil available water and unavailable water all had a good correlation to soil organic carbon, and the correlation coefficient is up to 0.83, 0.80 and 0.79 respectively.

Key words: soil water holding capacity; soil available water; Ziwuling secondary forest region

土壤水分是影响黄土高原植被建设的最重要因子,对土壤水分的有效性、土壤持水能力进行研究,对于植被的合理布局与水分利用都有重要的意义。长期的人工植被容易产生土壤干层^[1-2],进而引起土壤退化^[3]。自然恢复植被具有更好的土壤水分效应,在黄土高原地区,封禁自然恢复是较有效的措施^[4]。

目前对于黄土高原不同植被的土壤持水供水等功能的研究多见于人工植被,对于天然恢复的植被的土壤水分功能研究相对少见。黄土高原子午岭北部的连家砭林场,具有完整的次生植被演替序列,对该序列下土壤的持水性能进行探讨,能够为黄土高原综合整治、植被恢复等提供一定的理论支持。

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 1 200 ~ 1 600 m,为半干旱季风气候。25 a 平均气温 7.4 °C,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,辽东栎林为该区顶级群落^[5]。

* 收稿日期: 2008-02-19

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BCA01A07, 2006BAD09B08)

作者简介: 梁向锋(1982 -),女,河南省许昌市人,硕士研究生,主要从事植被恢复的土壤环境效应研究。E-mail: liangxiangf05@mails.gucas.ac.cn

通信作者: 赵世伟(1962 -),男,四川省荣县人,研究员,主要从事土壤与水分管理研究。E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn

2 材料与方法

2.1 样点选择

2007 年 5 月,在野外踏查的基础上,根据植被的恢复年限、结构、群落组成和当地居民访问的结果,在子午岭植被演替序列中选择由白羊草草地到辽东栎顶级群落的 5 个植被类型作为处理,分别为:白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)草地、沙棘(*Seabuckthorn*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)纯林。选择人为干扰较小且具有代表性的样方作为采样点,各样点基本形状见表 1。在样方的中部挖 1 m 深土壤剖面,分 5 层取样土壤样品:0 - 5,5 - 10,10 - 30,30 - 60,60 - 100 cm。同时取环刀样和原装土带回实验室分析。

2.2 试验方法

土壤水分特征曲线采用离心机法(测定 0.1×10^5 , 0.2×10^5 , 0.4×10^5 , 0.6×10^5 , 0.8×10^5 , 1×10^5 , 2×10^5 , 4×10^5 , 6×10^5 , 8×10^5 , 10×10^5 Pa 共 11 个点的土壤水吸力 - 土壤含水量数据)。15 $\times 10^5$, 20 $\times 10^5$ Pa 土壤含水量由拟合的 Gardner 方程求得;土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法;水稳性团聚体应用改进的 Yoder 湿筛法测定,即根据黄土的特性,事先将土壤湿润,振动时间由 30 min 改为 1 min,粒径分别为: > 5 mm, $5 \sim 2$ mm, $2 \sim 1$ mm, $1 \sim 0.5$ mm, $0.5 \sim 0.25$ mm。

表 1 试验地土壤基本理化性状

| 样地 | 深度/ cm | SOC/ (g · kg ⁻¹) | 容重/ (g · cm ⁻³) | 水稳性团聚体/ % | | |
|-----|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------|----------------|----------------|
| | | | | > 5 mm | 0.25 ~ 5 mm | < 0.25 mm |
| 辽东栎 | 0 - 5 | 30.05 | 0.89 | 10.81 | 65.11 | 24.08 |
| | 5 - 10 | 15.60 | 1.02 | 31.94 | 46.90 | 21.16 |
| | 10 - 30 | 7.26 | 1.02 | 24.80 | 45.16 | 30.04 |
| | 30 - 60 | 3.77 | 1.23 | 37.31 | 29.17 | 33.52 |
| | 60 - 100 | 2.83 | 1.21 | 6.27 | 29.14 | 64.59 |
| 山杨 | 0 - 5 | 42.62 | 0.75 | 31.10 | 44.01 | 24.89 |
| | 5 - 10 | 25.64 | 0.98 | 28.60 | 45.53 | 25.87 |
| | 10 - 30 | 9.10 | 1.13 | 49.15 | 26.24 | 24.61 |
| | 30 - 60 | 4.55 | 1.25 | 16.11 | 41.74 | 42.15 |
| | 60 - 100 | 3.26 | 1.23 | 5.22 | 44.91 | 49.87 |
| 沙棘 | 0 - 5 | 24.85 | 0.92 | 11.99 | 53.05 | 34.96 |
| | 5 - 10 | 14.58 | 1.11 | 38.83 | 34.49 | 26.68 |
| | 10 - 30 | 9.02 | 1.17 | 52.97 | 22.92 | 24.12 |
| | 30 - 60 | 2.77 | 1.28 | 10.10 | 39.69 | 50.22 |
| | 60 - 100 | 2.67 | 1.31 | 4.94 | 38.13 | 56.93 |
| 狼牙刺 | 0 - 5 | 34.85 | 0.89 | 45.22 | 35.06 | 19.72 |
| | 5 - 10 | 25.85 | 0.86 | 56.73 | 27.43 | 15.84 |
| | 10 - 30 | 7.04 | 1.19 | 69.28 | 18.99 | 11.72 |
| | 30 - 60 | 3.86 | 1.24 | 33.35 | 37.26 | 29.39 |
| | 60 - 100 | 2.83 | 1.29 | 8.39 | 48.05 | 43.56 |
| 白羊草 | 0 - 5 | 16.86 | 1.14 | 44.60 | 39.44 | 15.96 |
| | 5 - 10 | 14.13 | 1.24 | 41.15 | 38.63 | 20.23 |
| | 10 - 30 | 7.79 | 1.22 | 53.76 | 29.64 | 16.59 |
| | 30 - 60 | 3.60 | 1.21 | 20.29 | 37.83 | 41.87 |
| | 60 - 100 | 2.79 | 1.29 | 2.78 | 49.50 | 47.72 |

3 结果与分析

3.1 土壤持水特性

3.1.1 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线是土壤容积含水量和土壤基质吸力之间的函数,是研究土壤持水特性的重要依据之一。研究表明,Gardner 的幂函数经验公式 $S = a \cdot b$ 对我国大部分土壤适合^[6]。式中: S ——土壤水势 ($- 1 \times 10^5$ Pa,取绝对值);
——土壤含水量(%干土重)。经转换可得出以 为因变量的关系式:

$$= AS^{-B} \quad (1)$$

对于式(1),当水吸力为 $- 1 \times 10^5$ Pa,则含水量 $= A$ 。可见模型中参数 A 是土水势为 $- 1 \times 10^5$ Pa 时的含水量。一般情况下, A 表征曲线的高低,亦即持水能力的大小, A 值越大,持水能力越强。当 A 值不变时, B 值越大 ($0 < B < 1$),则曲线越靠近水吸力轴,说明 B 表示 A 值一定时水分特征曲线与水势轴的贴近程度,反映了土壤水势值变化时,土壤含水量的变化快慢程度。子午岭 5 种典型植被下土壤水分特征曲线拟合关系如表 2,相关系数均达到了 0.98 以上。

表 2 各样地土壤水分特征曲线和释水曲线拟合参数

| 样地 | 深度/cm | A | B | r | A · B | B + 1 |
|-----|----------|-------|------|------|-------|-------|
| 辽东栎 | 0 - 5 | 23.40 | 0.19 | 1.00 | 4.52 | 1.19 |
| | 5 - 10 | 19.73 | 0.22 | 0.98 | 4.43 | 1.22 |
| | 10 - 30 | 15.80 | 0.23 | 0.99 | 3.56 | 1.23 |
| | 30 - 60 | 14.36 | 0.25 | 0.99 | 3.53 | 1.25 |
| | 60 - 100 | 14.21 | 0.26 | 0.99 | 3.70 | 1.26 |
| 山杨 | 0 - 5 | 22.23 | 0.21 | 0.99 | 4.72 | 1.21 |
| | 5 - 10 | 18.27 | 0.20 | 1.00 | 3.66 | 1.20 |
| | 10 - 30 | 16.76 | 0.22 | 1.00 | 3.61 | 1.22 |
| | 30 - 60 | 13.47 | 0.24 | 0.99 | 3.27 | 1.24 |
| | 60 - 100 | 14.46 | 0.23 | 0.99 | 3.31 | 1.23 |
| 沙棘 | 0 - 5 | 16.10 | 0.24 | 0.99 | 3.93 | 1.24 |
| | 5 - 10 | 15.18 | 0.23 | 0.99 | 3.56 | 1.23 |
| | 10 - 30 | 14.60 | 0.24 | 0.99 | 3.56 | 1.24 |
| | 30 - 60 | 13.35 | 0.24 | 0.99 | 3.26 | 1.24 |
| | 60 - 100 | 13.73 | 0.24 | 0.99 | 3.29 | 1.24 |
| 狼牙刺 | 0 - 5 | 18.41 | 0.20 | 1.00 | 3.72 | 1.20 |
| | 5 - 10 | 18.49 | 0.22 | 1.00 | 3.99 | 1.22 |
| | 10 - 30 | 16.98 | 0.21 | 1.00 | 3.53 | 1.21 |
| | 30 - 60 | 16.08 | 0.20 | 1.00 | 3.15 | 1.20 |
| | 60 - 100 | 16.50 | 0.22 | 1.00 | 3.58 | 1.22 |
| 白羊草 | 0 - 5 | 16.95 | 0.21 | 1.00 | 3.56 | 1.21 |
| | 5 - 10 | 16.81 | 0.22 | 1.00 | 3.63 | 1.22 |
| | 10 - 30 | 14.87 | 0.23 | 1.00 | 3.38 | 1.23 |
| | 30 - 60 | 14.24 | 0.24 | 0.99 | 3.39 | 1.24 |
| | 60 - 100 | 13.81 | 0.24 | 0.99 | 3.38 | 1.24 |

以表 2 中所示参数 A 为指标,5 种植被群落下土壤的持水能力大小为:辽东栎 > 山杨 > 狼牙刺 > 白羊草 > 沙棘。由参数 B 可见,土壤含水量随水势降低而递减的速度,以沙棘最快,其次为白羊草,辽东栎最慢。土壤持水能力与土壤有

机质含量、黏粒含量、比表面及孔性等性质有关。辽东栎、山杨、狼牙刺植被下土壤有机质含量较高,土壤团聚体含量高,土壤毛管孔隙度大,故持水能力较强。沙棘林、草地的土壤有机质含量低、团聚体含量较少(表 1),其持水能力较弱。

3.1.2 土壤比水容量

土壤比水容量(C)是土壤水分特征曲线的斜率, d / dS。表示单位水势变化时土壤吸入或释出的水量,是土壤释水的量化指标,在评价土壤水分有效性程度方面具有极重要意义。对(1)式求导便得到:

C = - d / dS = A · B · S^{-(B+1)} (2)

由(2)式可知,当水势等于 - 1 × 10⁵ Pa 时, C = A · B,也即

A · B · 10⁻² ml / (g · 10⁵ Pa),就是土水势为 - 1 × 10⁵ Pa 时的比水容量。而 B + 1 则表明比水容量随水势变化远比含水量变化快,且此时 B 值影响远较(1)式小。根据(2)式计算出各植被下土壤在不同水吸力时的比水容量(表 3)。由此可以看出,各植被下土壤的比水容量变化均较大。各植被下土壤比水容量变化趋势较相似, - 0.5 × 10⁵, - 3.0 × 10⁵, - 20 × 10⁵ Pa 是水容量变化的关键点。各水吸力下的比水容量分别为 - 0.2 × 10⁵ Pa 下的 2.9 ~ 3.1 倍, 25 ~ 29 倍, 240 ~ 310 倍。

综合表 2, 3, 相同土壤水吸力下, A · B 值大的土壤其 C 值也大。土壤 A · B 值表现为白羊草最小, 辽东栎最大, 即随着植被的正向演替而逐步提高, 相同水吸力下的 C 也表现了同样的规律。说明植被的恢复提高了土壤释水能力。

表 3 不同植被下土壤比水容量 10⁻² ml / (10⁵ Pa · g)

Table with 13 columns: 样地, 深度/cm, and 不同的土壤水吸力/10⁵ Pa (0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 3.0, 5, 7.0, 10, 15, 20). Rows include 辽东栎, 山杨, 沙棘, 狼牙刺, and 白羊草 at various depths.

3.1.3 土壤水分有效性分级

土壤含水量按其植物的有效性和土水势可分为重力水、有效水(速效水 + 迟效水)、无效水。一般将田间持水量作为土壤重力水与有效水的分界点,即有效水上限。将永久萎蔫含水量作为土壤有效水下限。根据前人研究结果及本实验的结论,本文把 - 0.3 × 10⁵ Pa 作为田间持水量。造林树种土壤水分永久萎蔫点可达 - 20 × 10⁵ Pa,因此将 - 20 × 10⁵ Pa 作为有效水下限。在有效水范围内,随着含水量的减少即土水势的增加,土壤水分对于植物利用的难度增加,将

有效水又分为速效水和迟效水, - 10 × 10⁵ Pa 为其分界^[7-8]。由表 4 可知,土壤潜在有效水含量和速效水含量山杨、辽东栎 > 沙棘、狼牙刺、白羊草。田间持水量中土壤有效水和无效水的比例较王孟本^[8]在晋西北的研究小,即无效水占的比例较高。从表 4 中还可以看到,土壤全有效水、速效水、迟效水以及无效水均随土层深度的增加而减小。土壤有效水范围为 11.07% ~ 16.37%,子午岭林区土壤有机质含量高,土壤结构好(表 1),因此土壤供水和持水能力均较强。

3.2 土壤持水力与土壤有机碳的关系

由表 1 知,不同植被和不同土层深度之间,土壤容重、团

聚体的差异均表现出子午岭林区土壤较黄土高原其它区域更好的结构(低容重,高团聚体含量)。其中,土壤有机碳含量则在不同层次和不同土层之间变异很大,变化范围为 2.67 ~ 42.62 g/kg。因此,为进一步探明土壤持水性能与土壤理化性状之间的相互关系,作了以下分析。

3.2.1 土壤持水性能与土壤理化性状

土壤水分特征曲线参数 A 与土壤理化性状有着显著的相关关系。表 5 表明,各个植被下土壤水分特征曲线参数 A

与土壤有机碳含量、土壤容重、<0.25 mm 团聚体含量均呈极显著相关。其中,土壤有机碳含量与 A 呈现极显著的正相关,即随着土壤有机碳含量的提高,土壤持水性能增强;土壤容重、<0.25 mm 团聚体含量与 A 极显著负相关,即土壤容重的下降和 <0.25 mm 水稳性团聚体含量的降低有利于土壤持水能力的提高。土壤有机质是土壤结构形成和稳定作用的核心物质,可以改善土壤结构、土壤胶体状况等。而土壤性质的改善必然引起土壤持水性能的提高。

表 4 土壤水分分级

| 样地 | 深度/cm | 有效水 | | | %干土重 |
|-----|----------|---------------------------------------|---|--|--|
| | | 无效水/ (< - 20 ×10 ⁵ Pa) | 全有效水/ (> - 0.3 ×10 ⁵ Pa) | 速效水/ (- 0.3 ×10 ⁵ ~ - 10 ×10 ⁵ Pa) | 迟效水 (- 10 ×10 ⁵ ~ - 20 ×10 ⁵ Pa) |
| 辽东栎 | 0 - 5 | 16.42 | 14.54 | 1.88 | 13.11 |
| | 5 - 10 | 15.77 | 14.08 | 1.69 | 10.07 |
| | 10 - 30 | 12.67 | 11.31 | 1.36 | 8.05 |
| | 30 - 60 | 12.44 | 11.16 | 1.28 | 6.87 |
| | 60 - 100 | 12.93 | 11.64 | 1.29 | 6.51 |
| 山杨 | 0 - 5 | 16.95 | 15.08 | 1.87 | 11.76 |
| | 5 - 10 | 13.23 | 11.74 | 1.49 | 10.02 |
| | 10 - 30 | 12.93 | 11.51 | 1.42 | 8.79 |
| | 30 - 60 | 11.53 | 10.34 | 1.19 | 6.51 |
| | 60 - 100 | 11.78 | 10.53 | 1.25 | 7.27 |
| 沙棘 | 0 - 5 | 13.86 | 12.43 | 1.43 | 7.74 |
| | 5 - 10 | 12.62 | 11.29 | 1.33 | 7.52 |
| | 10 - 30 | 12.56 | 11.27 | 1.30 | 7.03 |
| | 30 - 60 | 11.48 | 10.29 | 1.18 | 6.42 |
| | 60 - 100 | 11.62 | 10.41 | 1.21 | 6.70 |
| 狼牙刺 | 0 - 5 | 13.42 | 11.91 | 1.51 | 10.05 |
| | 5 - 10 | 14.28 | 12.71 | 1.56 | 9.69 |
| | 10 - 30 | 12.69 | 11.28 | 1.41 | 9.12 |
| | 30 - 60 | 11.40 | 10.10 | 1.30 | 8.95 |
| | 60 - 100 | 12.82 | 11.42 | 1.40 | 8.61 |
| 白羊草 | 0 - 5 | 12.80 | 11.38 | 1.42 | 9.04 |
| | 5 - 10 | 12.99 | 11.57 | 1.42 | 8.80 |
| | 10 - 30 | 12.04 | 10.75 | 1.29 | 7.52 |
| | 30 - 60 | 11.98 | 10.73 | 1.25 | 6.98 |
| | 60 - 100 | 11.91 | 10.68 | 1.23 | 6.64 |

土壤有机碳是土壤结构形成和改善的核心物质,其含量的高低与土壤持水功能必定有重要关系,目前此方面的研究还鲜见报道。土壤团聚体和颗粒组成是形成土壤各级孔隙的基础,土壤团聚结构越好,土壤毛管孔隙度越高。由表 5 看出,A 与土壤有机碳含量的相关系数最高达到 0.83,其次为容重,- 0.80。

表 6 的结论与表 5 相似,不同之处在于土壤有效水与土壤理化性状的相关系数的绝对值,土壤容重最大,达到 0.83,而有机碳为 0.80,均达到极显著水平。

土壤有效水与土壤理化性状相关性很好。土壤有机碳含量与土壤有效水呈现极显著的正相关;容重与之呈现极显著的负相关。

表 5 模型参数 A 与土壤理化性状相关系数矩阵

| 相关系数 | A | SOC | 容重 | <0.25 mm |
|----------|-----------|-----------|---------|----------|
| A | 1.00 | | | |
| SOC | 0.83 ** | 1.00 | | |
| 容重 | - 0.80 ** | - 0.93 ** | 1.00 | |
| <0.25 mm | - 0.57 ** | - 0.53 ** | 0.50 ** | 1.00 |

由表 5,6 知,各因子之间也有很好的相关性:土壤有机碳含量和土壤容重与其余各因子之间的相关系数均达到了极显著水平。说明植被恢复首先是提高了土壤有机碳含量,进而改善其结构和持水、供水功能。

表 6 土壤有效水与土壤理化性状相关系数矩阵

| 指标 | 全有效水 | SOC | 容重 | < 0.25 mm 团聚体含量 |
|-----------|-----------|-----------|---------|--------------------|
| 全有效水 | 1.00 | | | |
| SOC | 0.80 ** | 1.00 | | |
| 容重 | - 0.83 ** | - 0.93 ** | 1.00 | |
| < 0.25 mm | - 0.41 * | - 0.53 ** | 0.50 ** | 1.00 |

3.2.2 土壤水分特征曲线参数与土壤有机碳

土壤有机碳含量 SOC (g/kg) 与土壤水分特征曲线 Gardner 模型中的参数 A 有明显的正相关关系,相关系数达 0.83。土壤有机碳含量的提高明显提高了土壤持水性能。

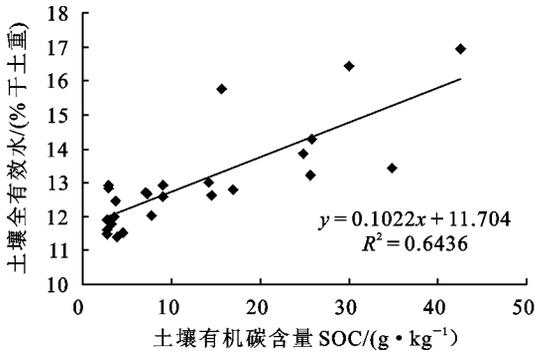


图 2 土壤有效水、无效水 (%干土重) 与土壤有机碳含量的关系

3.2.3 土壤有效水、无效水与土壤有机碳

土壤有效水、无效水含量分别代表特定土壤水吸力下的土壤含水量,因此也是土壤持水力的指标。如图 2 所示,土壤有效水含量、无效水含量与土壤有机碳含量的相关系数分别达到了 0.80 和 0.79。

4 结 论

子午岭次生林区土壤持水力和供水力随植被的正向演替而提高,植被间土壤持水力表现为:辽东栎 > 山杨 > 狼牙刺 > 白羊草 > 沙棘。土壤比水容量即释水能力表现为乔木林大于灌木林和草地。

土壤有机碳含量与土壤持水性能有很好的相关性,相关系数达到 0.8 左右,表明植被的正向演替提高了土壤有机碳含量,从而改善了土壤的持水性能。

参考文献:

[1] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等.黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J].北京林业大学学报,

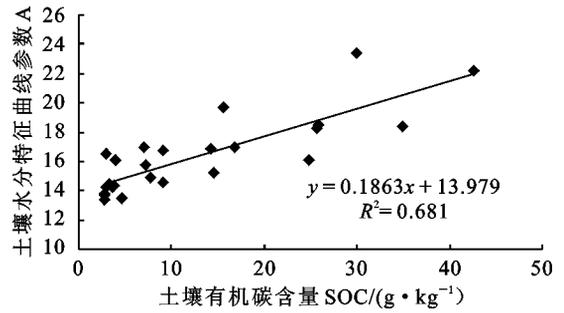
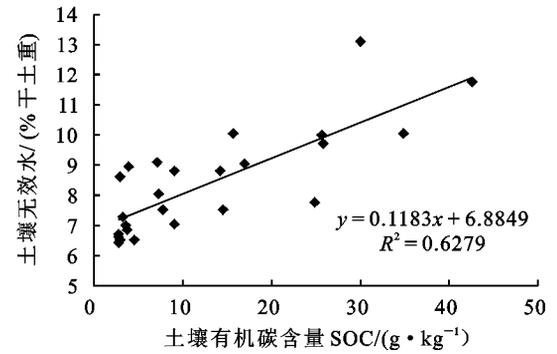


图 1 土壤水分特征曲线参数 A 与土壤有机碳含量的关系



1998,20(3):7-14.
 [2] 陈云明,刘国彬,侯喜录.黄土丘陵半干旱区人工沙棘林水土保持和土壤水分生态效益分析[J].应用生态学报,2002,13(11):1389-1393.
 [3] 王力,邵明安,侯庆春.土壤干层量化指标初探[J].水土保持学报,2000,14(4):87-90.
 [4] 焦菊英,焦锋,温仲明.黄土丘陵沟壑区不同恢复方式下植被群落的土壤水分和养分特征[J].植物营养与肥料学报,2006,12(5):667-674.
 [5] 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.
 [6] 沈思渊,席承藩.淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系[J].土壤学报,1990,27(1):34-42.
 [7] 张小泉,张清华,毕树峰.太行山北部中山幼林地土壤水分的研究[J].林业科学,1994,30(3):193-200.
 [8] 王孟本,柴宝峰,李宏建,等.黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J].林业科学,35(2):7-14.

(上接第 14 页)

[10] Kamphorst E C. Predicting depression storage from soil surface roughness. [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000,64:1749-1758.
 [11] 赵西宁,王万忠,吴发启.不同耕作管理措施对坡耕地降雨入渗的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(2):69-72.
 [12] Linden D K, Van D M Doren J R. Parameter for characterizing tillage-induced soil surface roughness[J].

Soil. Sci. Soc. Am. J., 1986, 50:1561-1565.
 [13] 赵晓光.黄土高原细沟产生的动力基础分析[J].中国水土保持,2003(8):16-17.
 [14] Ghadiril H, Rosel C W, Misra R K. 等高耕作与径流减缓、泥沙沉积[J].中国水土保持,2002(7):33.
 [15] Hillel D. Soil and water-physical principles and processes[M]. New York:Academic Press,1971.