三峡库区不同生境下桑树林地土壤结构稳定性与持水性能

于亚莉[1],史东梅[2],蒋 平[2],丁文斌[2]

(1.重庆市水利电力建筑勘测设计研究院,重庆 400020;
2.西南大学资源环境学院,西南大学水土保持生态环境研究所,重庆 400715)

摘要: 为保证桑树在三峡库区困难立地条件下的正常生长,对该区砾石土、粗骨土、砾质土和扰动土 4 种生境土壤结构稳定性与持水性能进行诊断,并探讨了各种生境障碍因素的改良途径。结果表明:(1)不同生境土壤物理性质差异显著($p<0.05$),土壤容重表现为粗骨土生境(1.30 g/cm^3)>砾石土生境(1.23 g/cm^3)>砾质土生境(1.12 g/cm^3)>扰动土生境(1.08 g/cm^3),砂粒含量为粗骨土生境>砾石土生境>砾质土生境>扰动土生境。(2)不同生境土壤抵御季节性干旱能力差异较大,总库容表现为砾石土生境(97.185 mm)>砾质土生境(81.139 mm)>扰动土生境(66.958 mm)>粗骨土生境(47.353 mm);而最大有效库容则为砾石土生境(54.140 mm)>砾质土生境(47.552 mm)>粗骨土生境(36.399 mm)>扰动土生境(11.705 mm),砾石土生境最好,扰动土最差。(3)不同生境土壤稳定性指数(ASI)表现为粗骨土生境(4.57)>砾石土生境(2.44)>砾质土生境(2.36)>扰动土生境(2.31),土壤稳定性与土壤砂粒呈显著或极显著正相关,与粉粒和粘粒呈显著负相关,与土壤孔隙状况相关性不显著。(4)桑树在不同生境的土壤障碍因素差异明显,在粗骨土生境可通过土壤改良剂和菌根接种调整土壤透水性能,在扰动土生境可通过施加保水剂改善土壤有效库容,而在砾石土和砾质土生境可通过种植固氮植物、绿肥改善土壤养分条件。

关键词: 土壤结构稳定性; 持水性能; 土壤生境; 桑树; 三峡库区

中图分类号: S152.4;S152.7;S888　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1009-2242(2016)06-0246-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.041

Soil Stability and Water-retention Properties of Different Mulberry Habitats in the Three Gorges Reservoir Area, China

YU Yali[1], SHI Dongmei[2], JIANG Ping[2], DING Wenbin[2]

(1. *Chongqing Surveying and Design Institute of Water Resources, Electric Power and Architecture, Chongqing* 400020; 2. *College of Resources and Environment, Institute of Soil and Water Conservation and Eco-environment, Southwest University, Chongqing* 400715)

Abstract: To ensure the continual growth of mulberry at inferior sites in the area of the Three Gorges Reservoir area, an analysis of soil structure stability and water-retention properties was conducted in 4 habitats defined as having stony, skeleton, gravelly and disturbed soils in this paper. Furthermore, the various soil factors acting as obstacles and the ways to improve habitats were discussed. The results showed that: (1) Significant differences ($p<0.05$) were found in soil physical properties at the different habitats, and the order of soil bulk density was skeleton soil (1.30 g/cm^3)>stony soil (1.23 g/cm^3)>gravelly soil (1.12 g/cm^3)>disturbed soil (1.08 g/cm^3); The sand grain content varied in the same order; (2) Resistance to seasonal drought was greatly different among these habitats, and soil total storage capacity was in the order of stony soil (97.185 mm)>gravelly soil (81.139 mm)>disturbed soil (66.958 mm)>skeleton soil (47.353 mm). Moreover, the maximum available capacity was stony soil (54.140 mm)>gravelly soil (47.552 mm)>skeleton soil (36.399 mm)>disturbed soil (11.705 mm); (3) The soil anti-erodibility index (ASI) for different habitats was in the order of skeleton soil (4.57)>stony soil (2.44)>gravelly soil (2.36)>disturbed soil (2.31). Correlation analysis indicated that soil stability was significantly or highly significant positively correlated with sand content, was highly significantly negatively correlated with powder and clay content, and was not significant correlated with soil porosity; (4) The soil factors considered as obstacles for mulberry were different in different

收稿日期: 2016-05-27
资助项目: 重庆市水利局项目"基于 RUSLE 模型的坡耕地水土保持监测技术规程","重庆市水力侵蚀监测点背景侵蚀环境研究"的部分成果
第一作者: 于亚莉(1977—),女,四川资阳人,主要从事水土保持规划设计及咨询工作。E-mail:13308387177@163.com
通信作者: 史东梅(1970—),女,甘肃灵台人,博士,教授,博士生导师,主要从事水土生态工程、土壤侵蚀与流域治理、生产建设项目土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:shidm_1970@126.com

habitats; soil amendments could be used to increase the soil permeability in gravelly soil habitats, water-retaining agents could be added to improve the soil available capacity in disturbed soil habitats, and nitrogen-fixing plants and green manure could be planted/added to increase soil nutrients in stony and gravelly soil habitats.

Keywords: soil structure stability; water-retention properties; soil habitat; mulberry; Three Gorges Reservoir area

三峡库区是中国乃至世界最为特殊的生态功能区之一,而重庆市域内三峡库区面积约占整个三峡库区面积的 80%,具有重要的生态地理位置[1]。根据 2005 年水土流失遥感调查,重庆市水土流失总面积为 52 039.53 km^2,占土地总面积的 63.15%,平均土壤侵蚀模数为 3 548.18 t/(a·km^2),每年土壤侵蚀总量达 1.85 亿吨。退耕还林还草是三峡库区水土流失防治和生态环境改善的根本措施[2]。桑树(*Morus alba* Linn.)具有适应性强、耐干旱脊薄、生长迅速、经济效益高等优势,其生长障碍主要与土壤水分、土壤有机质等因素有关。近年来桑树在石漠化治理、退耕还林工程等发挥重要作用且在三峡库区应用广泛[3],但在三峡库区存在多种退化严重的困难生境。土壤结构稳定性表征土壤抵御外界破碎应力大小,通常包括土壤机械稳定性和土壤团聚体的水稳定性,不仅在调节土壤肥力、维持土地生产力方面具有重要作用,而且与土壤抗侵蚀性能及环境质量密切相关[4]。土壤团聚体是评价土壤结构和土壤物理性状的重要指标,各径级团聚体分布不仅直接影响着土壤结构体内的孔隙分布、水肥运移方式及其他理化性状[5];土壤团聚体稳定性与土壤侵蚀难易程度和地表径流大小密切相关,是反映土壤抗侵蚀性的重要指标之一。国内学者从成土母质、土地利用方式对土壤结构及其稳定性影响因素开展了大量研究工作[6],但从保证植物稳定生长的角度,对困难生境土壤结构稳定性研究较少。因此本文从保证桑树正常生长的角度,对三峡库区 4 种生境条件下土壤结构稳定性和持水性进行诊断,目的在于:(1)分析不同生境下的土壤物理力学特征及改良途径;(2)评价不同生境的土壤水库、抗旱性能及改善途径;(3)揭示不同生境的土壤结构稳定性和持水性及实现途径。这些研究有助于全面了解在不同困难生境下桑树正常生长的水土条件,为在三峡库区利用桑树开展水土保持生态环境修复提供技术支持,对有效减少土壤侵蚀程度、提高困难生境的水土保持生态服务功能具有重要实践指导意义。

1　研究区概况

研究区位于重庆市北碚区天府镇,属于川东部盆地副热带湿润气候,常年降水量一般在 923.4～1 308.7 mm 之间,区域内空气湿度较大,年平均相对湿度为 81%。全年平均气温在 16.8～18.5 ℃之间,最低气温 3.1 ℃,最高气温达到 40 ℃。天府镇年平均日照时数为 1 169.5 h,日照的百分率 27%,历年平均无霜期达 328.5 d。土壤主要由暗紫色水稻土、冷泥黄泥水稻土、暗紫泥土、矿子黄泥土、冷沙黄泥土等组成。由于地处观音峡背斜轴部地带,岩层倾斜角大,所以土地主要以坡地为主。在 2 125.9 hm^2 耕地中,<25°土地面积为 897.8 hm^2。天府镇山高坡陡,加上煤矿、石灰石的长期开采,破坏了槽谷地带地表水条件,水土流失严重,土地严重退化,但其气候条件完全适宜生态桑产业发展。

本研究于 2012 年 7 月在北碚区天府镇境内选择了 4 种生境条件桑树林地:砾石土生境(LS)、粗骨土生境(CG)、砾质土生境(LZ)和扰动土生境(RD),各生境条件特征见表 1。4 种生境地面坡度表现为:扰动土生境(36°)>砾质土生境(18°)>砾石土生境(15°)>粗骨土生境(6°),其土层厚度分别为 15,25,28,25 cm;土壤自然含水率分别为 17.24%,23.69%,24.07%,16.56%。

表 1　不同生境条件桑树林地基本特征

编号	生境条件	土层厚度/cm	土壤类型	株行距/m	树龄/a	株高/m	坡向	坡度/(°)	地理位置
LS	砾石土	28	黄壤	丛状种植	3～4	2.80	东南	15	106°24′35.1″E,29°50′26.7″N
CG	粗骨土	25	紫色土	1.8×2.1	1～2	2.02	西	6	106°29′36.2″E,29°48′17.6″N
LZ	砾质土	25	黄壤	1.4×2.3	2～3	3.13	东南	18	106°27′45.8″E,29°51′1.2″N
RD	扰动土	15	煤矿弃土弃渣	1.5×2.5	2～3	1.75	东	36	106°26′27.3″E,29°46′34.7″N

2　研究方法

2.1　样品采集

在 4 种生境条件桑树林地分别选取 3 个具有代表性的采样点,每个采样点距离桑树植株茎 10 cm,清理地表杂物后按 0—10,10—20 cm 土层进行分层采样,每层采集大约 4 kg 原状土壤,装入硬质容器内,带回实验室内风干。同时,每层采集 3 个铝盒样品、3 个容重环刀样品和 4 个抗剪环刀样品,用于测定土壤自然含水率、土壤容重、土壤孔隙状况和抗剪强度等指标。

2.2　土壤理化力学性质测定

土壤理化性质测定主要有[7]土壤容重采用环刀

法；土壤机械组成采用吸管法，土壤质地采用美国农部制分类；土壤总孔隙度利用土壤容重经验公式计算为土壤总孔隙度 $\rho(100\%)=93.947-32.995d$，式中：$d$ 为土壤容重；毛管孔隙度采用室内环刀原状土吸水法；非毛管孔隙度是总孔隙度减去毛管孔隙度；土壤有机质含量采用高温外热重铬酸钾氧化法。水稳性指数根据文献[9]测定；原状土壤抗剪强度采用ZJ型(三速)电动式直剪仪测定，以100，200，300，400 kPa的垂直压力进行剪切，剪切速率为1.2 mm/min。

2.3 土壤水库特征计算

土壤是布满大大小小孔隙的疏松多孔体，土层深厚的土壤具有显著的存蓄、调节水分的功能，称之为土壤水库。土壤水库的蓄水量可以按文献[9]计算，设某时刻地表以下一定深度 H 处的土壤含水量为 θ(h)，则该深度土层相应的蓄水量为：

$$W_a=\int_0^H \theta(h)dh$$

式中：W_a 为地表以下 H 深度土层的土壤蓄水量(mm)。

土壤水库各种库容的计算方法为：

$$总库容=0.1\sum_{i=1}^{n}(S_i\times r_i\times H_i)$$

$$列库容=0.1\sum_{i=1}^{n}(Wl_i\times r_i\times H_i)$$

$$兴利库容=0.1\sum_{i=1}^{n}[(C_i-Wl_i)\times r_i\times H_i]$$

$$滞洪库容=0.1\sum_{i=1}^{n}[(S_i-C_i)\times r_i\times H_i]$$

最大有效库容＝总库容—死库容

式中：Wl_i 为第 i 层土壤凋萎持水量(%)；r_i 为第 i 层土壤土壤密度(g/cm^3)；H_i 为第 i 层土壤土层厚度(cm)；n 为土壤层次；C_i 为第 i 层土壤田间持水量(%)；S_i 为第 i 层土壤饱和持水量(%)。

2.4 土壤结构稳定性评价

选取水稳性指数、结构破坏率和团聚体稳定性指数来对几种生境条件土壤结构稳定性进行评价，以此分析不同生境土壤结构稳定性差异。土壤微团聚体采用吸管法，各级风干团聚体和水稳性团聚体含量采用干筛法、湿筛法。

(1)结构破坏率：

$$结构破坏率(\%)=\frac{干筛(>0.25mm团聚体)-湿筛(>0.25mm团聚体)}{干筛(>0.25mm团聚体)}\times 100\%$$

(2)稳定性指数：土壤结构稳定性是指团聚体抵抗外力分散的性能，常用土壤颗粒保存几率和土壤团聚体稳定性指数进行分析。运用概率转移矩阵法[10]对团聚体保存机率进行计算，将 i 个粒径范围的风干团聚体百分含量构成一个矩阵 M_i，湿筛后对应的团聚体百分含量为矩阵 N_i。每个筛径在筛分时保存在自己筛径范围内的机率为 $X_1,X_2,\cdots,X_i$，则 $MX=N$，采用各粒级保存机率作为土壤团聚体稳定性的指标：

$$稳定性指数\ ASI=X_1+X_2+X_3+\cdots+X_i$$

式中：ASI为土壤团聚体稳定性指数；X 为各粒级保存机率。

(3)水稳性指数：$K=\dfrac{\sum P_iK_i+P_j}{A}$

式中：K 为水稳性指数；P_i 为第 i min的分散土粒数；i、j 为1，2，…，10；K_i 为第 i min的校正系数；P_j 为10 min内没有分散的土粒数；A 为试验的总土粒数(50)。

3 结果与分析

3.1 不同生境下桑树林地土壤有机质和物理及力学特征

土壤理化力学性质特点及数量特征直接反映了不同生境条件的土壤质量状况，直接或间接地影响着水、肥、气、热状况，进而影响植物生长发育。容重和孔隙度直接影响土壤的通气性和透水性，是决定土壤水分涵养的重要因素。由表2可知，不同生境土壤颗粒组成差异显著($p<0.05$)。粗骨土砂粒含量(53.74%)最高，分别为砾石土、砾质土和扰动土的3.76，2.02，2.01倍，主要因为粗骨土大部分为风化碎屑颗粒；而不同生境条件下砾石土、砾质土和扰动土土壤粘粒含量分别为粗骨土的5.52，5.33，4.85倍，说明粗骨土通气透水性能良好，但保水保肥能力很差，在旱季，植物容易因土壤缺水而枯死。同时，表明砾石土、砾质土和扰动土的胶结物质含量较低，从而影响了大颗粒土壤团粒结构的形成；同一生境下表、底层土壤机械组成差异不显著。不同生境土壤容重表现为粗骨土生境＞砾石土生境＞砾质土生境＞扰动土生境，其值分别为1.30，1.23，1.12，1.08 g/cm^3，这主要与其土壤有机质含量、粘粒含量、结构状况和松紧度以及孔隙状况等有关；对于同一生境下桑林地而言，底层(10—20 cm)土壤容重均显著大于表层(0—10 cm)，这主要是表层土壤受地表植被枯落物及浅层根系的作用，使得表层土壤紧实度较低。

从不同生境土壤(0—20 cm)来看，毛管孔隙度在48.82%～55.72%之间变化，表现为扰动土生境＞砾质土生境＞砾石土生境＞粗骨土生境；总孔隙度为扰动土生境(58.00%)＞砾质土生境(56.97%)＞砾石土生境(53.42%)＞粗骨土生境(51.19%)，扰动土生境比粗骨土生境增加了13.30%。对于有机质而言，不同生境有机质含量为21.80～34.51 g/kg，分布特征为粗骨土生境＞扰动土生境＞砾石土生境＞砾质土生境；同一生境下，除扰动土生境外，表层有机质含量均显著高于底层($p<0.05$)，这主要是地表枯落物和根系分泌物增加了表层有机质含量。不同生境条件(0—20 cm)土壤力学特性差异显著($p<0.05$)，粘

聚力表现为砾质土生境（49.22 kPa）＞砾石土生境（16.71 kPa）＞粗骨土生境（13.78 kPa）＞扰动土生境（10.05 kPa），砾质土生境比扰动土生境显著增加了 390%；对于不同土层而言，表层土壤粘聚力和内摩擦角均较底层的大，说明表层土壤力学稳定性更好，抵抗剪切破坏性能更高。

表 2　不同生境条件下土壤有机质和物理及力学性质

生境条件	土层/cm	机械组成/%			容重/（g·cm^{-3}）	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	有机质/（g·kg^{-1}）	粘聚力/（kPa）	内摩擦角/（°）
		砂粒	粉粒	粘粒							
LS	0—10	13.32c	61.94a	23.79a	1.16b	53.70ab	2.04b	55.75a	31.65b	20.73b	26.21a
	10—20	15.24c	59.67a	24.11a	1.30a	49.10b	1.99b	51.09b	20.63bc	12.69bc	24.48a
	0—20	14.28c	60.81a	23.95a	1.23ab	51.40b	2.02b	53.42ab	26.14bc	16.71bc	25.35a
CG	0—10	57.72a	10.41c	3.78b	1.24ab	50.41b	2.75ab	53.16ab	46.00a	20.30b	25.09a
	10—20	49.76a	14.32c	4.90b	1.36a	47.23c	1.99b	49.21b	23.02bc	7.25c	9.62c
	0—20	53.74a	12.37c	4.34b	1.30a	48.82c	2.37b	51.19ab	34.51b	13.78bc	17.36b
LZ	0—10	24.74b	49.86ab	24.54a	1.08c	55.06a	3.11a	58.16a	27.85bc	42.19a	12.22bc
	10—20	28.54b	49.08ab	21.74a	1.16b	53.02ab	2.75ab	55.77a	15.74c	56.24a	6.65c
	0—20	26.64b	49.47ab	23.14a	1.12b	54.04a	2.93ab	56.97a	21.80bc	49.22a	9.44c
RD	0—10	26.31b	32.08b	20.56a	1.06c	55.57a	3.41a	58.98a	27.29bc	9.87c	12.35bc
	10—20	27.22b	30.15b	21.58a	1.09c	55.86a	1.16c	57.02a	28.05bc	10.23c	13.35bc
	0—20	26.77b	31.12b	21.07a	1.08c	55.72a	2.29b	58.00a	27.67bc	10.05c	12.85bc

注：表中粒级分类采用美国制；同列数据不同字母表示处理差异显著（$p<0.05$）。

3.2　不同生境下桑树林地土壤水库性能分析

土壤水库指土壤作为一个充满大小空隙的疏松多孔体所明显具有的容纳和转移水分的功能，可用来评价土壤持水特性；土壤水库库容对分析土壤抗旱能力及区域土壤侵蚀的潜在危害性有重要作用[11]，土壤库容表征可以细分为总库容、有效库容、死水库容、滞洪库容。对不同生境条件下土壤水库特征（表 3）分析表明，土壤总库容和调蓄功能差异明显。不同生境土壤水库差异显著（$p<0.05$），总库容变化规律是砾石土生境（97.185 mm）＞砾质土生境（81.139 mm）＞扰动土生境（66.958 mm）＞粗骨土生境（347.353 mm），说明砾石土生境、砾质土生境、扰动土生境土壤所能容蓄的水量均较大，而粗骨土因其粘粒含量少而贮水能力较低；死库容大小分布在 10.954～55.253 mm 之间，其中扰动土无效水分最高，这既减少了扰动土对植物生长的水分供给量，也减少了土壤水分循环；土壤兴利库容以粗骨土生境（30.792 mm）最大，扰动土生境（7.960 mm）最小，说明粗骨土能较长时间贮存水分可为植物生长提供更多的有效水分，而扰动土水分则不易贮存，容易导致植被因干旱缺水死亡。

表 3　不同生境条件下土壤水库特征值

生境条件	土层/cm	土壤饱和含水率/%	土壤凋萎水势/%	田间持水量/%	总库容/mm	死库容/mm	兴利库容/mm	滞洪库容/mm	最大有效库容/mm
LS	0—10	39.134a	27.472a	29.236a	45.395c	20.268cd	13.646b	11.482c	25.128c
	10—20	39.878a	27.524a	29.057a	51.841c	22.781cd	14.993ab	14.067b	29.060c
	0—20	39.506a	27.498a	29.147a	97.185a	43.045a	28.657a	25.483a	54.140a
CG	0—10	19.572b	14.215b	16.436b	24.269d	5.227c	15.154b	3.889d	19.043c
	10—20	16.853b	14.211b	15.675b	22.920d	5.727c	15.591b	1.602d	17.193c
	0—20	18.213b	14.213b	16.056b	47.353c	10.954d	30.792a	5.607d	36.399b
LZ	0—10	36.758a	25.621a	28.484a	39.699c	16.871d	13.892b	8.936d	22.828c
	10—20	37.473a	26.153a	28.532a	43.469c	18.737d	14.360b	10.372c	24.731c
	0—20	37.116a	25.887a	28.508a	83.139a	35.587b	28.271a	19.281a	47.552a
RD	0—10	32.675a	23.735a	26.953a	34.636cd	25.159c	3.411c	6.065d	9.476d
	10—20	33.245a	24.141a	27.031a	33.245cd	28.486c	3.410c	7.333d	4.759d
	0—20	33.479a	24.023a	27.484a	66.958b	55.253a	7.960c	13.789b	11.705cd

注：同列数据同类字母表示处理无显著差异（$p<0.05$）。

土壤滞洪库容大小依次为砾石土生境（25.483 mm）＞砾质土生境（19.281 mm）＞扰动土生境（13.789 mm）＞粗骨土生境（5.607 mm），说明砾石土在降雨时特别是暴雨时防洪能力最强，更多的降雨能较快地通过非毛管孔隙通道进入土壤水库，从而达到减少地表径流的目的。不同生境土壤最大有效库容差异显著（$p<0.05$），表现为砾石土生境＞砾质土生境＞粗骨土生境＞扰动土生境，砾石土生境和砾质土生境有较大的最大有效库容，有利于接纳降水。对于同一生境土壤而言，表层土壤总库容较底层有增加也有减少，其增加幅度大小依次为粗骨土生境（6.08%）＞扰动土生境（4.18%）＞砾质土生境（−8.67%）＞砾石土生

境(−12.43%);表层土壤死库容均低于底层,其降低幅度的规律表现为扰动土生境(11.68%)>砾石土生境(11.03%)>砾质土生境(9.96%)>粗骨土生境(8.73%),说明表层土壤有效贮水比率高利于植物浅层根系吸收水分。土壤结构性是影响土壤水分状况最重要的因素,特别是团聚体及其稳定性对土壤渗透性、持水性等有直接作用。相关研究表明土壤中有机碳含量的增加是提高土壤结构稳定性的重要因子,能够降低容重、改善孔隙状况等土壤物理性质,从而改善降雨入渗过程及入渗率,恢复土壤水库功能。粗骨土生境和扰动土生境最大有效库容低(11.705,36.399 mm),可供植物吸收的水分较少,导致植物生长发育缓慢;土壤水分不得低于土壤有效水分的50%才可以保证桑树健康生长。因此在粗骨土和扰动土生境土壤中可实施保水剂和绿肥措施,提高土壤水有效库容量,从而改善土壤对有效水的保持和供应能力。

3.3 不同生境下桑树林地土壤结构稳定性特征

从表4可知,团聚体结构组成均以>5,5～3,1～0.5 mm粒径为主,>5 mm团聚体平均含量可达40%以上,而粗骨土生境和扰动土生境较少,分别为12.16%,26.54%;>0.25 mm干筛团聚体含量表现为砾石土生境(95.58%)>砾质土生境(94.14%)>粗骨土生境(93.01%)>扰动土生境(78.71%)。对于同一生境而言,表层土壤>5 mm干筛团聚体含量均高于底层,主要是表层土壤有机质含量高促进了土壤大团聚体的形成;表层和底层>0.25 mm干筛团聚体含量差异不明显。

不同生境土壤经过湿筛后,1～0.5 mm和0.5～0.25 mm团聚体含量增加,>5,5～3,3～2 mm粒级团聚体含量显著减少;粗骨土生境>0.25 mm湿筛团聚体含量高于其他类型,>0.25 mm水稳性团聚体含量大小依次为:粗骨土生境(85.56%)>砾石土生境(69.75%)>砾质土生境(66.86%)>扰动土生境(48.70%),说明扰动土生境土壤水稳定性较其他生境弱,这主要因为扰动土生境胶体含量少,对颗粒的凝聚、胶结和粘结作用就弱,进而水稳定性最差,在降雨径流作用下易发生土壤和养分流失。对于同一生境而言,表层土壤水稳性团聚体含量均高于底层,主要是表层土壤有机质含量高和桑树根系较多,进而提高了表层土壤水稳定性。

表4 不同生境条件下土壤大团聚体各粒级分布及其稳定性特征

生境条件	土层/cm	处理方式	不同粒径下的土壤团聚体组成/%							结构破坏率/%	稳定性指数	水稳性指数 K
			>5 mm	5～3 mm	3～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm			
LS	0—10	干筛	54.21	12.36	8.95	7.75	9.41	2.98	95.66	24.69	2.62	0.65
		湿筛	26.73	7.34	4.58	13.10	7.56	12.72	72.03			
	10—20	干筛	52.29	11.50	11.23	6.70	10.25	3.53	95.50	29.36	2.25	0.36
		湿筛	9.52	7.34	4.29	14.09	10.68	21.54	67.47			
	0—20	干筛	53.25	11.93	10.09	7.23	9.83	3.26	95.58	27.03	2.44	0.50
		湿筛	18.13	7.34	4.44	13.60	9.12	17.13	69.75			
CG	0—10	干筛	12.01	16.83	26.34	16.12	19.00	3.59	93.88	6.88	4.72	1.00
		湿筛	8.36	15.53	9.40	32.77	13.60	7.77	87.43			
	10—20	干筛	12.31	18.82	20.86	17.96	17.72	4.47	92.14	9.18	4.41	1.00
		湿筛	7.12	19.19	8.28	25.90	9.93	13.26	83.68			
	0—20	干筛	12.16	17.83	23.60	17.04	18.36	4.03	93.01	8.03	4.57	1.00
		湿筛	7.74	17.36	8.84	29.34	11.77	10.52	85.56			
LZ	0—10	干筛	47.76	13.99	9.07	7.71	11.05	3.70	93.28	25.52	2.55	0.44
		湿筛	20.76	7.60	2.36	12.00	8.99	17.76	69.47			
	10—20	干筛	42.35	14.68	12.06	8.49	13.23	4.19	94.99	32.37	2.16	0.36
		湿筛	5.78	6.30	3.92	14.31	10.21	23.72	64.24			
	0—20	干筛	45.06	14.34	10.57	8.10	12.14	3.95	94.14	28.95	2.36	0.40
		湿筛	13.27	6.95	3.14	13.16	9.60	20.74	66.86			
RD	0—10	干筛	27.65	13.57	10.93	7.77	16.15	6.30	82.36	39.58	2.47	0.46
		湿筛	12.69	8.00	3.56	8.03	4.70	12.78	49.76			
	10—20	干筛	25.43	11.08	9.01	7.28	15.23	7.01	75.05	41.02	2.15	0.40
		湿筛	10.05	10.35	3.01	7.10	3.65	13.47	47.63			
	0—20	干筛	26.54	12.33	9.97	7.53	15.69	6.66	78.71	40.30	2.31	0.43
		湿筛	11.37	9.18	3.29	7.57	4.18	13.12	48.70			

土壤团聚体数量和组成决定了土壤结构的稳定性,特别是>1 mm大团聚体对调节土壤通气与持水以及营养平衡释放有着重要意义,是植物良好生长的结构基础,而且其含量与土壤肥力水平密切相关。而不同生境土壤>1 mm大团聚体含量大小依次为砾石土(82.25%)>砾质土(78.07%)>粗骨土(70.63%)>扰动土(56.37%),扰动土含量最低,阻碍了桑树的生长和发育,可以施加土壤改良剂,改善土壤团聚体状况。

不同粒径的团聚体对于协调土壤养分的保持与供应、改善孔隙组成、土力学性质和生物学性质具有不同的作用。本文选取能够准确反映不同生境土壤结构稳定性特征，具体结果见表 4。不同生境条件土壤结构破坏率分布在 8.03%～40.30%之间，大小依次为扰动土生境＞砾质土生境＞砾石土生境＞粗骨土生境，粗骨土最好，扰动土最差；土壤稳定性指数大小表现为粗骨土生境(4.57)＞砾石土生境(2.44)＞砾质土生境(2.36)＞扰动土生境(2.31)，表明粗骨土生境土壤抵抗机械破坏的性能最好；土壤水稳性指数 K 表现为粗骨土生境＞砾石土生境＞扰动土生境＞砾质土生境，主要与其粗骨化母岩风化碎屑土性质有关。

生境条件是影响森林形成与植被生长发育的各种自然环境因子的综合。生境条件在很大程度上决定了植物生长发育过程，而植物又对其生长的环境产生重大影响。因此探讨桑树林地土壤稳定性与其生境条件的关系具有很大必要性。对不同生境土壤机械组成、容重、孔隙度、有机质、粘聚力、内摩擦角等生境因子与其结构破坏率、稳定性指数、水稳性指数 K 进行了相关分析(表 5)。从表 5 可知，表征桑树林地土壤稳定性指标结构破坏率与土壤砂粒含量成显著负相关($p<0.01$)，与粘粒含量成显著正相关($p<0.01$)，这表明砂粒含量越高土壤结构破坏率越低，其抵抗机械破坏的性能越好；而土壤孔隙特征与结构破坏率相关性未达显著水平。稳定性指数与土壤机械组成中砂粒含量呈极显著正相关，而与土壤粉粒和粘粒含量极显著负相关，这表明土壤机械组成对土壤稳定性具有重要作用。水稳性指数与土壤砂粒含量呈显著正相关，与粉粒和粘粒分别呈显著和极显著负相关。说明在各生境因子中，土壤机械组成是影响桑树林地土壤稳定性的重要因子，土壤机械组成中粉粒、粘粒含量越大，土壤稳定性越好；反之则越差。

表 5　桑树林地土壤稳定性与生境因子的关系

土壤稳定性指标	砂粒	粉粒	粘粒	土壤容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	有机质含量	黏聚力	内摩擦角
结构破坏率	−0.776*	0.648	0.842*	−0.658	0.673	0.424	0.658	0.187	0.249	−0.251
稳定性指数	0.914**	−0.877**	−0.970**	0.558	−0.597	−0.196	−0.554	0.146	−0.411	0.146
水稳性指数	0.821*	−0.797*	−0.922**	0.545	−0.561	−0.300	−0.539	0.140	−0.460	0.201

注：表中 * 表示 $p<0.05$ 水平；** 表示 $p<0.01$ 水平。

4　讨　论

(1)西南石漠化区属于典型生态脆弱区，具有降雨季节分布不均、地表易干旱缺水且地形低洼处易涝和土层瘠薄等特点[12]；而煤矿区弃土弃渣系统生物多样性低、重金属含量过高、pH 值太低、养分匮乏等因素，给矿区生态重建带来不利影响[13]。

生境条件对桑树正常生长具有决定性作用，研究区桑树生长障碍因素主要表现为土壤砂粒化严重、孔隙状况较差、有机质含量低、土壤有效库容小和土壤结构稳定性低等方面。通过实地调查获得南方地区不同地力等级的桑树林地土壤条件特征(表 6)。

表 6　不同地力等级的桑树林地土壤条件

林地等级	坡度/(°)	土层厚度/cm	容重/(g·cm⁻³)	质地	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	土壤饱和含水率/%	土壤凋萎水势/%	田间持水量/%	有机质含量/%	pH
高产	＜5	＞50	0.9～1.0	壤质土	52～58	10～15	62～68	48～61	8～15	34～40	＞1.6	6.5～7.5
中产	6～25	30～50	1.0～1.2	粘土	43～51	7～10	53～61	28～47	16～20	22～28	1.0～1.6	5.5～6.5
低产	25～45	10～30	1.3～1.4	砂土	36～43	3～6	46～52	18～28	21～25	16～21	0.5～1.0	4.5～5.5

本文研究区为轻度石漠化区的 4 种生境条件，土层厚度均低于 30 cm 且有机质含量均＜3.5%，不利于桑树根系分布及水分养分吸收，属低产土层厚度范围；土壤容重在 1.08～1.30 g/cm^3 之间变化，严重阻碍了土壤生物的活动，不利于桑树林地土壤养分的积累，属中产容重范围；土壤非毛管孔隙度较低，在 1.16%～3.41%之间变化，阻碍了水分养分的迁移，导致深层根系养分水分吸收不足，属于低产非毛管孔隙范围；各生境土壤饱和含水率相对较低，不利于桑树根系对水分的有效利用，而土壤凋萎水势主要在 24.023%～27.498%之间变化，减少了桑树根系可利用的有效水分，属中低产土壤水分条件。

(2)在实践中可采取各种"改地适树"措施改善桑树生境条件，使其充分发挥水土保持生态环境修复功能。相关研究表明，植被通过增加地表凋落物和地下有机物(细根及根系分泌物)输入，可显著降低土壤容重(约为 31.56%)[14]、改善土壤持水能力和入渗性能，从而改善土壤综合物理性质。在三峡库区桑树根系具有强大的固土能力，是土壤抗剪强度增加值的主要贡献者[15]。桑树根系接种真菌菌株(arbuscular mycorrhiza fungi，AMF)可使植株成活率提高 20.16%～49.85%，抗干旱及耐贫瘠能力得到显著增强；可以使表层土团聚度和团聚状况分别提高 25.12%和 50.16%[16]，石漠化地区研究表明菌根桑对土壤团聚体稳定性的提高

有积极贡献[17]；同时减轻贫瘠干旱胁迫，加快土壤微生物群落构建，提高土壤生物活力，可加快实现胁迫环境的生态修复[18]。实施土壤改良剂作用主要体现：①改善土壤理化性质：土壤总孔隙度增加21.05%，土壤容重减小15.16%～23.46%，田间持水量增大，土壤毛管孔隙、非毛管孔隙和通气度增加20.29%～32.68%[19]；②提高土壤稳定性：土壤水稳性团粒含量增加18.39%，土壤结构得到了改善，土壤抗水蚀能力增加，水土流失相应减少35.18%～58.62%[20]。因此在实践中，根据4种困难生境条件特点，综合应用菌根接种、土壤改良剂、绿肥中的一种或几种措施，可加快生态脆弱区的植被恢复与重建，持续发挥桑树水土保持生态环境效应。

5 结论

（1）不同生境土壤物理性质差异显著（$p<0.05$），粗骨土生境砂粒含量（53.74%）最高，分别为砾石土生境、砾质土生境和扰动土生境的3.76，2.02，2.01倍；土壤容重表现为粗骨土生境＞砾石土生境＞砾质土生境＞扰动土生境，其值分别为1.30，1.23，1.12，1.08 g/cm^3。

（2）不同生境土壤抵御季节性干旱能力差异较大，总库容表现为砾石土生境（97.185 mm）＞砾质土生境（81.139 mm）＞扰动土生境（66.958 mm）＞粗骨土生境（47.353 mm）；而最大有效库容表现为砾石土生境（54.140 mm）＞砾质土生境（47.552 mm）＞粗骨土生境（36.399 mm）＞扰动土生境（11.705 mm），砾石土生境最好，扰动土最差。

（3）不同生境土壤稳定性指数ASI为粗骨土生境（4.57）＞砾石土生境（2.44）＞砾质土生境（2.36）＞扰动土生境（2.31），土壤水稳性指数K表现为粗骨土生境＞砾石土生境＞扰动土生境＞砾质土生境，粗骨土生境最好，扰动土生境较差；砾质土生境最差；土壤砂粒、粉粒和粘粒含量是土壤结构稳定性的重要影响因子。

（4）桑树在不同生境的土壤障碍因素差异明显，粗骨土生境表现为土壤砂粒化严重且透水性差，可通过土壤改良剂和接种菌根调整；扰动土生境障碍因素为有效库容低，可通过施加保水剂改善土壤水库库容。砾石土和砾质土生境表现为容重较大、有机质低，可通过种植固氮植物、绿肥改善土壤养分。

参考文献：

[1] 李月臣，刘春霞，闵婕，等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态学报，2013，33(1)：168-178.

[2] 罗海波，钱晓刚，刘方，等. 喀斯特山区退耕还林（草）保持水土生态效益研究[J]. 水土保持学报，2003，17(4)：31-34.

[3] 汪三树，黄先智，史东梅，等. 基于Le Bissonnais法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究[J]. 生态学报，2013，18(4)：5589-5598.

[4] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001, 99(1)：123-145.

[5] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management：A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2)：3-22.

[6] 王艳玲，王燕，李凌宇，等. 成土母质与利用方式双重影响下红壤团聚体的组成特征与稳定性研究[J]. 土壤通报，2013，44(4)：776-785.

[7] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海：上海科技出版社，1978.

[8] 史晓梅，史东梅，文卓立. 紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗蚀性特征研究[J]. 水土保持学报，2007，21(4)：63-66.

[9] 孙仕军，丁跃元，曹波，等. 平原井灌区土壤水库调蓄能力分析[J]. 自然资源学报，2002，17(1)：42-47.

[10] 石辉. 转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性[J]. 水土保持通报，2006，26(3)：91-95.

[11] 刘洁，李贤伟，纪中华，等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报，2011，31(8)：2331-2340.

[12] 王荣，蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式[J]. 应用生态学报，2010，21(4)：1070-1080.

[13] 范英宏，陆兆华，程建龙，等. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术[J]. 生态学报，2003，23(10)：2144-2152.

[14] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, et al. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* Lam. plantations in the Horqin sandy land of Northeast China[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 40(1)：78-85.

[15] 南宏伟，贺秀斌，鲍玉海，等. 桑树根系对紫色土土壤抗剪强度的影响[J]. 中国水土保持，2011(8)：48-51.

[16] Harley J L. The relationship of mycorrhizal relations in trees for agroforestry and land rehabilitation[J]. Forest Ecology Management, 1996, 81：1-17.

[17] 舒玉芳，叶娇，潘程远，等. 三峡库区桑树菌根发育特征及菌根对桑苗生长的促进作用[J]. 蚕业科学，2011，37(6)：978-984.

[18] 刘代军，涂波，施松梅，等. 石漠化地区的生态危机及菌根桑生物修复潜力研究进展[J]. 中国岩溶，2012，31(2)：185-190.

[19] Sheppard S K, Mc Carthy A J, Loug hnane J P, et al. The impact of sludge amendment on methanogen community structure in an upland soil[J]. Applied soil ecology, 2005, 28(2)：147-162.

[20] 吴淑芳，吴普特，冯浩. 高分子聚合物对土壤物理性质的影响研究[J]. 水土保持通报，2003，23(1)：42-45.