

网络出版时间:2017-03-07 11:17

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.04.022

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170307.1117.044.html>

三峡库区消落带 2 种树木林下土壤的物理性质比较

邬静淳, 欧阳, 熊兴政, 万盼, 刘芸

(西南大学 资源环境学院 林学系, 重庆 400715)

[摘要] 【目的】研究不同树种对三峡库区消落带土壤物理性质的影响, 为三峡库区消落带植被恢复与重建提供科学依据。【方法】以重庆市主城区消落带植被恢复治理示范区石门段 2 个树种(南川柳纯林和枫杨纯林)林下土壤为研究对象, 以相邻荒地土壤为对照, 对 3 月(消落带出露期)至 7 月(消落带旱季)的土壤体积质量、土壤孔隙度、土壤持水量等物理性质进行比较。【结果】3 月, 枫杨林下土壤物理性质与荒地土壤差异不大, 3 个土层平均土壤总孔隙度(23.05%)、田间持水量(69.51 g/kg)甚至略逊于荒地土壤(27.88%和 86.24 g/kg); 7 月, 枫杨林下土壤物理性质明显优于荒地土壤。3 月, 南川柳林下土壤物理性质优于枫杨林下土壤; 7 月, 枫杨林下土壤物理性质明显优于南川柳林下土壤。与 3 月相比, 7 月南川柳土壤物理性质指标均出现小幅下降, 但变化不显著; 枫杨林下土壤由于毛管孔隙显著增加(3 个土层毛管孔隙度平均值由 18.86%增加至 41.20%), 土壤物理性质指标均显著提高; 荒地土壤物理性质未出现显著变化。【结论】2 种三峡库区消落带适生树种的林下土壤物理性质存在明显差异, 但均能对消落带土壤物理性质起到保护和改善作用。

[关键词] 三峡库区; 消落带; 土壤物理性质; 植被恢复

[中图分类号] S724; S152

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2017)04-0157-08

Comparison of soil physical properties under 2 kinds of trees in hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir area

WU Jingchun, OU Yang, XIONG Xingzheng, WAN Pan, LIU Yun

(Department of Forestry, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing, 400715, China)

Abstract: 【Objective】This study investigated the influence of different trees on soil physical properties in hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir area to provide scientific basis for vegetation restoration and reconstruction in this area. 【Method】Soil under two kinds of trees (*Salix rosthornii* Seemen and *Pterocarya stenoptera*) in hydro-fluctuation belt vegetation restoration management demonstration area in Chongqing was studied using adjacent waste land as control. Soil physical properties (soil bulk density, soil porosity, and soil water retention) were compared between March (exposing period) and July (dry season). 【Result】In March, physical properties of *P. stenoptera* soil had little difference with those of waste land. The average soil total porosity (23.05%) and field capacity (69.51 g/kg) of 3 soil layers were slightly less than those of waste land (27.88% and 86.24 g/kg). In July, physical properties of *P. stenoptera* soil were significantly better than those of waste land. In March, physical properties of *S. rosthornii* Seemen soil were significantly better than those of *P. stenoptera* soil. In July, physical properties of *P. stenoptera* soil were significantly better than those of *S. rosthornii* Seemen soil. Compared with March, physical properties of *S. rosthornii* Seemen soil decreased slightly in July while physical properties of *P.*

[收稿日期] 2016-01-21

[基金项目] 国家自然科学基金项目(31370602)

[作者简介] 邬静淳(1992—), 男, 四川大邑人, 在读硕士, 主要从事湿地保护与恢复生态学研究。E-mail: 365874644@qq.com

[通信作者] 刘芸(1966—), 女, 四川资中人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事生态学研究。E-mail: liuyun19970205@163.com

stenoptera soil improved significantly due to increase of capillary pore (average capillary porosity of 3 soil layers increased from 18.86% to 41.20%). There were no significant changes of physical properties in waste land.【Conclusion】Soil properties under these 2 kinds of optimum trees in hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir area were significantly different, but both can play a role in protection and improvement of soil physical properties.

Key words: Three Gorges reservoir area; hydro-fluctuation belt; soil physical properties; vegetation restoration

消落带指由于季节性水位涨落而使水库周边被淹没土地出露水面的一段特殊区域,是水位反复周期性变化的干湿交替区,也是水域生态系统和陆地生态系统交互过渡的地带^[1]。三峡库区消落带是指水库正常蓄水位海拔 175 m 与防洪限制水位海拔 145 m 之间的区域,周期性水位变化使该区域物质循环和能量转换异常活跃,生态环境极端敏感而脆弱,成为当地政府和国家环境治理的重点^[2-5]。

大量研究和实践证明,消落带植被具有拦蓄泥沙和固体污染物、保持水土、稳定河岸、保护河流水质和生物多样性等多种重要的生态功能,在提高水陆生态系统生产力以及维持区域生态系统动态平衡等方面具有明显效果,因此植物生态修复是消落带和河岸带受损生态系统治理非常有效的途径之一^[6-12]。由于三峡库区消落带具有反季节淹水、夏季干旱等特点,适生植物筛选一直是三峡库区植被恢复的重点^[13-15]。目前,桑树(*Morus alba* Linn. Sp.)、南川柳(*Salix rosthornii* Seemen)、秋华柳(*Salix variegata* Franch.)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、小栎木(*Swida paucinervis* (Hance) Sojak)、杭子梢(*Campylotropis macrocarpa* (Bge.) Rehd.)等已作为适生植物^[16-19]在三峡库区消落带植被恢复实践中被大量运用。然而,随着这些植物的生长发育,消落带生态环境如何变化,以及这些植物在适应生境的同时能否有效保护消落带生态环境,有关这方面的问题目前还缺乏了解。

土壤是植被生存的基础,植物通过根系与土壤连成一个统一的整体,时刻与土壤进行着物质和能量交换。土壤通过调配水分、热量、营养物质,来维持植物的正常生理功能,植物的生长代谢也会影响土壤理化性质、抗蚀性等。目前,普遍认为植物和土壤相互作用是通过根系和枯枝落叶等代谢产物实现的^[20-23],并且在一个植物群落中,优势种往往决定着整个群落的发展方向以及群落对环境质量的影响。因此,在三峡库区消落带植被恢复和重建中,土壤物理性状及其变化可以作为检验植被恢复效果的重要

指标之一。

本研究选取位于重庆主城区消落带植被恢复示范区石门段构建的 5 年生人工植物群落,以其中生长状况良好的枫杨(*Pterocarya stenoptera*)纯林和南川柳(*Salix rosthornii* Seemen)纯林为研究对象,研究消落带出露期(3 月)和夏季干旱期(7 月)2 个优势树种林下土壤的物理性质,初步探讨 2 个树种对消落带土壤环境的影响,以期为消落带植被恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验样地位于重庆市江北区北滨一路石门大桥南侧,消落带治理示范区石门段,属于三峡水库正常蓄水位海拔 162~175 m 影响区域,坡度 5°~45°,面积约 10 000 m²。本试验采样点分布在北纬 29.56°、东经 106.49°附近。该区域属于亚热带季风性湿润气候,冬暖夏热,无霜期长,雨量充沛,多年年均气温 13.8~18.8℃,多年≥10℃年有效积温 4 175.47~6 049.30℃,多年年降水量 968.05~1 420.60 mm,平均值 1 138.45 mm,多年日照时数为 884.95~1 662.70 h^[24]。土壤类型为潮土(发育在河流冲积及海相沉积物上,是受潜水作用形成的一类土壤),土质为砂壤土。

重庆主城消落带治理示范区建设于 2005—2011 年,目前消落带植被恢复已初见成效。经调查,研究区内有草本植物 34 种、灌木 7 种、藤本植物 1 种、乔木 6 种。消落带海拔 168 m 以下以 1 年生及多年生草本植物为主;海拔 168 m 以上逐渐有乔木分布,形成了分别以枫杨、南川柳、池杉(*Taxodium ascendens*. Brongn)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides* Huet Cheng)等高大乔木为主,林下零散分布有甜根子草(*Saccharum spontaneum* Linn)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.)、小栎木、红蓼(*Polygonum orientale* L.)等低矮灌草的群落。

1.2 样地设置与样品采集

本试验选取消落带治理示范区三峡大坝正常蓄水位 170~175 m 影响区内 2009 年人工种植的枫杨和南川柳的林下土壤作为研究对象,分别在 2014 年 3 月和 7 月采样。在坡度(15°~20°)和郁闭度(50%~60%)基本相同的相邻枫杨和南川柳林下以及邻近荒坡分别选择一个 10 m×10 m 的区域,按梅花形布点法选择取样点 5 个,并分别分层(0~10, 10~20 和 20~30 cm)采集土壤样品。在每个取样点挖掘 1 个土壤剖面,每个土层用体积 100 cm³ 环刀(直径 5 cm、高 5 cm)取样^[25]。每个群落 5 个采样点,3 个样地共 45 个土壤样品。样品带回室内进行相关性质的测定。

1.3 指标的测定与计算

测定项目包括土壤质量含水量、土壤体积质量、最大持水量、毛管持水量、田间持水量(又称最小持水量)、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度,并计算土壤通气度、最佳含水量下限、土壤排水能力。以上指标均按照中华人民共和国林业行业标准《森林土壤水分-物理性质的测定》(国家林业局,2000)中的规程进行。部分指标计算公式如下:

土壤体积含水量=土壤质量含水量×
土壤体积质量/水的密度。(1)

土壤通气度=总孔隙度-土壤体积
含水量×0.1。(2)

最佳含水量下限=田间持水量×0.7。(3)

排水能力=最大持水量-最小持水量。(4)

1.4 相关数据收集

本研究中的气象水文数据来自气象(www.

weather.com.cn)、航运(www.cjmsa.gov.cn)、水文(www.ctg.com.cn)等行业官方网站公布的数据。

1.5 数据分析

数据分析处理应用 SPSS 19.0 进行,采用方差分析和多重比较分别对比了不同土层、不同时间和不同群落土壤的体积质量、孔隙度以及持水量的差异性,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。相关图表制作在 Microsoft Excel 2010 中完成。

2 结果与分析

2.1 2009—2014 年每年 10 月至次年 2 月三峡大坝蓄水水位的日变化情况

消落带植被恢复困难的主要原因是长时间周期性反季节淹水,长时间淹水会对植物和土壤造成巨大影响。本研究所三峡库区消落带海拔 170~175 m 区域的植被主要受到大坝蓄水水位>170 m 的影响,而自 2009 年以来对三峡大坝蓄水水位的观测数据显示,水位>170 m 仅出现在每年 10 月至次年 2 月中下旬。因此,本研究对 2009—2014 年每年 10 月至次年 2 月三峡大坝蓄水水位的日变化情况进行了统计分析,结果见图 1 和表 1。

自 2010 年 10 月三峡大坝 175 m 试验性蓄水成功后,每年 10 月可达到 170 m 以上高水位,并会保持 100 d 以上。本研究选择的南川柳与枫杨经过 4 次冬季淹水依然生长良好,对消落带特殊生境表现出良好的适应性,因此被作为试验对象研究其对消落带土壤物理性质的影响。

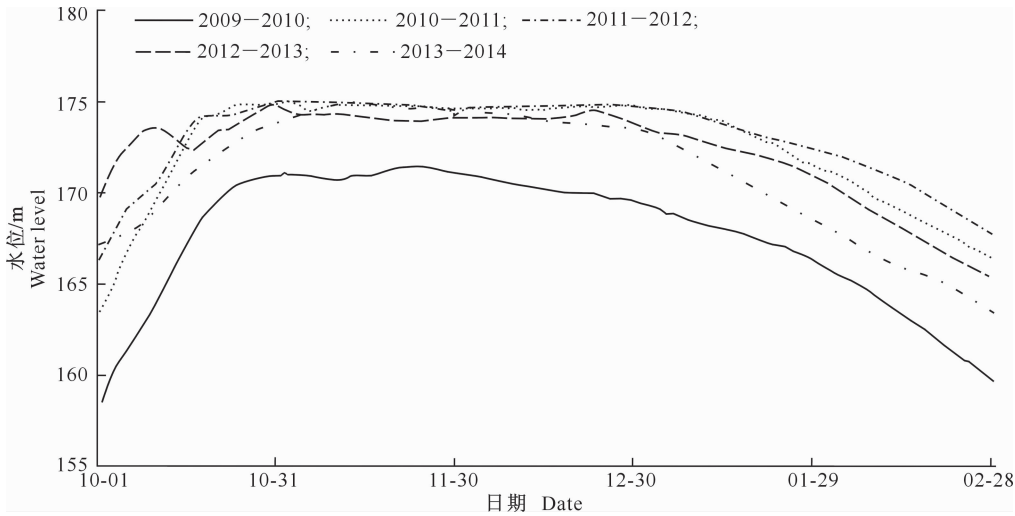


图 1 2009—2014 年三峡大坝蓄水水位的日变化
Fig. 1 Daily change of water level of the Three Gorges Dam during 2009—2014

表 1 2009—2014 年三峡大坝蓄水水位变化的统计结果

Table 1 Statistical change of water level of the Three Gorges Dam during 2009—2014			
年份 Year	最高水位/m Max water level	水位达 170 m 日期 170 m submerge date	水位>170 m 历时/d >170 m submerged duration
2009—2010	171.41	10-23	58
2010—2011	175.00	10-12	119
2011—2012	175.00	10-10	130
2012—2013	174.87	10-02	124
2013—2014	174.98	10-13	100

2.2 三峡库区消落带 2014 年 3—7 月气候的变化

植物能否适应当地气候也是制约三峡库区消落带植被恢复的重要因素之一。重庆地区属于亚热带季风性湿润气候,每年 7—9 月高温、伏旱、暴雨等极

端天气现象频发,因此对植物的抗逆性要求较高。同时,良好的植被恢复能有效改善土壤质量,减少极端天气引起的水土流失、面源污染等不良后果。而三峡库区消落带海拔 170~175 m 于每年 2 月底或 3 月初出露,因此 3—7 月是植被恢复的关键时期,故本研究以 2014 年 3—7 月气候变化为例,对三峡库区消落带进行分析(图 2,表 2)。

2014 年 3—7 月重庆以阴雨天为主,降水充足,日照时间较短,最高气温 38 ℃,最低气温 9 ℃,这种气候条件总体有利于消落带植物的恢复和生长。本研究所选南川柳和枫杨为重庆地区常见植物,均能够很好地适应重庆的气候特点,这是植被恢复效果显著的重要原因之一,也是被选作本试验研究对象的重要原因。

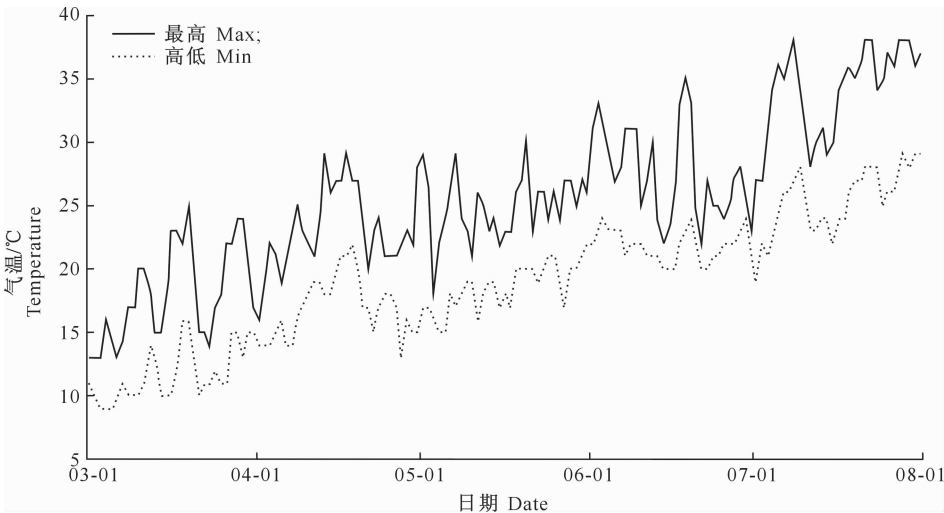


图 2 三峡库区消落带 2014 年 3—7 月气温的动态变化

Fig. 2 Temperature change in hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir during March to July in 2014

表 2 三峡库区消落带 2014 年 3—7 月气候的变化

Table 2 Climate change in hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir during March to July in 2014							
月份 Month	时间/d Time			降水量/mm Precipitation	日照时数/h Sunshine duration	最高气温/℃ Max temp	最低气温/℃ Min temp
	阴 Cloudy	雨 Rain	晴 Sunny				
3	18	12	1	150~160	40~50	25	9
4	11	19	0	120~130	70~80	29	13
5	10	18	0	230~240	70~80	30	15
6	6	24	0	250~260	50~60	35	20
7	12	7	6	100~110	200~210	38	19

2.3 三峡库区消落带 2 种树木林下土壤物理性质的变化

2.3.1 土壤体质量、孔隙度和通气度 土壤体质量指在自然结构状况下单位体积土壤的质量,是衡量土壤肥力的指标之一。通常土壤体质量小,表明土壤比较疏松、孔隙多;反之土壤体质量大,表明土体紧实、结构性差、孔隙少。由表 3 可以看出,3 月,南川柳和枫杨林下各土层土壤体质量均

显著低于荒地土壤,南川柳和枫杨林下土壤体质量总体差异不显著。7 月,枫杨林下 3 个土层土壤体质量平均值(1.19 g/cm³)<南川柳林下土壤(1.43 g/cm³)<荒地土壤(1.54 g/cm³),枫杨林下各土层土壤体质量依然显著低于荒地土壤,但是 7 月南川柳林下土壤体质量较 3 月明显增大,20~30 cm 土层土壤体质量(1.44 g/cm³)高于荒地同土层土壤(1.43 g/cm³),而 7 月枫杨林下土壤

体积质量与 3 月相比总体变化不大。

表 3 三峡库区消落带 2 个树种林下各土层土壤的体积质量和排水能力

Table 3 Soil bulk density and soil drainage capacity of each soil layer under 2 kinds of trees in hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir area							
月份 Month	样地 Sample plot	土壤体积质量/(g·cm ⁻³) Soil bulk density			土壤排水能力值/mm Soil drainage capacity		
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
3	荒地 Wasteland	1.58±0.11 a	1.57±0.07 a	1.58±0.08 a	7.64±1.98 b	7.59±1.00 c	6.33±1.73 b
	南川柳 <i>Salix rosthornii</i> Seemen	1.12±0.05 d	1.14±0.04 d	1.11±0.05 c	8.51±1.25 b	7.66±2.27 c	6.15±2.11 b
	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	1.19±0.06 cd	1.32±0.07 c	1.16±0.03 c	8.31±0.99 b	5.93±0.65 c	7.61±0.93 b
7	荒地 Wasteland	1.66±0.10 a	1.52±0.05 a	1.43±0.12 b	7.16±0.88 b	8.84±1.24 bc	11.43±2.19 a
	南川柳 <i>Salix rosthornii</i> Seemen	1.44±0.07 b	1.41±0.11 b	1.44±0.07 b	9.01±1.94 b	11.51±4.79 ab	7.58±1.85 b
	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	1.23±0.06 c	1.15±0.04 d	1.19±0.07 c	11.66±1.97 a	13.24±2.31 a	13.35±2.52 a

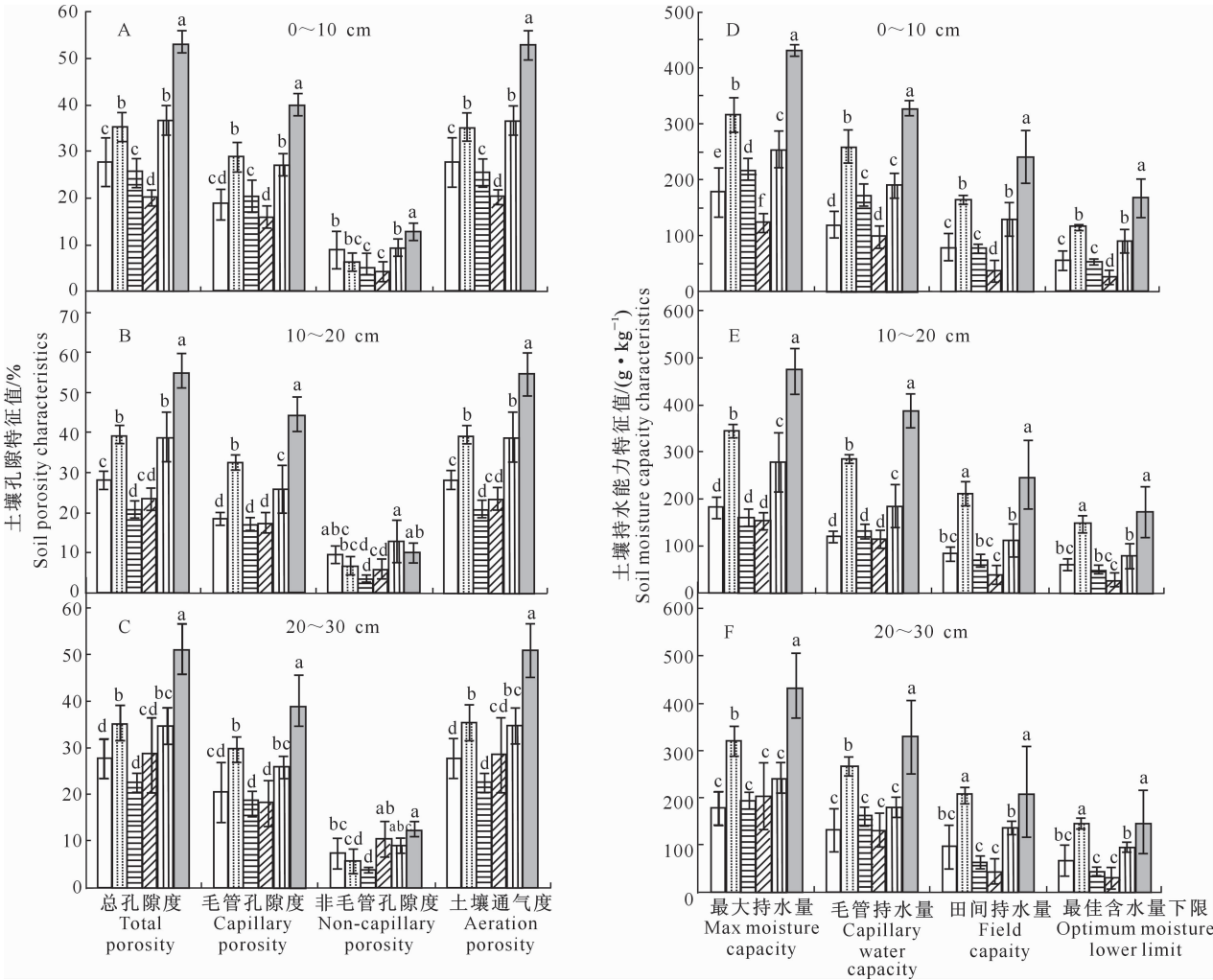
注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$)。
Note:Lowercase letters within each column indicate significant difference($P<0.05$).

土壤中各种形状的粗细土粒集合排列成固相骨架,骨架内部有宽狭和形状不同的孔隙,构成复杂的孔隙系统,全部孔隙容积占土体总容积的百分比,称为土壤孔隙度。土壤孔隙不仅是土壤养分、水分、空气和微生物等的传输通道、贮存库和活动空间,也是植物根系生长的场所。土壤孔隙分为 $<0.1\text{ mm}$ 的毛管孔隙和 $>0.1\text{ mm}$ 的非毛管孔隙,土壤总孔隙度等于毛管孔隙度与非毛管孔隙度之和。土壤总孔隙度反映土壤潜在的蓄水和调节降雨的能力,毛管孔隙度的大小反映了土壤吸持水分用于维持自身生长发育的能力,非毛管孔隙度的大小反映了土壤滞留水分发挥涵养水源的能力。由图 3 可以看出,3 月,南川柳林下 3 个土层土壤总孔隙度平均值(36.67%) $>$ 荒地土壤(27.88%) $>$ 枫杨林下土壤(23.05%);而 7 月,枫杨林下 3 个土层土壤总孔隙度平均值(52.98%) $>$ 南川柳林下土壤(36.73%) $>$ 荒地土壤(24.07%)。在 3—7 月,枫杨林下土壤总孔隙度显著增加,南川柳只有小幅增加,而荒地土壤出现了下降。根据毛管孔隙度和非毛管孔隙度变化情况发现,枫杨林下土壤孔隙增加主要是由于土壤毛管孔隙显著增加所致。2 个树种林下土壤通气度的变化与总孔隙度类似。

2.3.2 土壤持水能力和排水能力 土壤持水量代表土壤储水、延缓地表径流以及为植被提供水分的能力。其中,土壤最大持水量指土壤所有孔隙被水充满情况下的含水量,也叫饱和持水量。在自然条件下,只有在降雨量极大或土壤被完全淹没时,土壤含水量才能达到最大持水量。当土壤达到最大持水

量时,土壤通气受阻,不利于植物生长。因此,土壤最大持水量越大,说明土壤持水能力越强。由图 3 可以看出,3 月,南川柳林下 3 个土层土壤最大持水量平均值(326.10 g/kg)显著高于枫杨林下土壤和荒地土壤,枫杨林下 3 个土层土壤最大持水量平均值(190.12 g/kg)与荒地土壤(178.16 g/kg)较接近。7 月,枫杨林下 3 个土层土壤最大持水量平均值(447.00 g/kg) $>$ 南川柳林下土壤(258.12 g/kg) $>$ 荒地土壤(160.14 g/kg)。

土壤毛管持水量和田间持水量也是反映土壤持水能力的重要指标。土壤毛管水是靠毛管吸引力而保持于土壤毛管孔隙中的水,在土壤中移动较快并且容易被植物吸收和利用,养分在土壤中的迁移和转化,与毛管水密切相关。由图 3 可知,本试验中 3 个土层土壤毛管持水量的变化情况与土壤毛管孔隙度一致,即 3 月土壤毛管持水量表现为南川柳林下土壤 $>$ 枫杨林下土壤 $>$ 荒地土壤,7 月表现为枫杨林下土壤 $>$ 南川柳林下土壤 $>$ 荒地土壤。土壤田间持水量是指地下水位较深时,土壤所能保持的最大含水量,是表征田间土壤保持水分能力的指标。3 月,南川柳林下 3 个土层土壤田间持水量平均值(193.89 g/kg)显著高于枫杨林下土壤和荒地土壤,枫杨林下 3 个土层土壤田间持水量平均值(69.51 g/kg)略低于荒地土壤(86.24 g/kg);7 月,枫杨林下 3 个土层土壤田间持水量平均值(231.92 g/kg) $>$ 南川柳林下土壤(125.72 g/kg) $>$ 荒地土壤(38.78 g/kg)。另外,3 个土层中土壤最佳含水量下限变化情况与田间持水量相同。



□ 3 月荒地土壤; ▨ 3 月南川柳林下土壤; ▩ 3 月枫杨林下土壤; ▪ 7 月荒地土壤;

▧ 7 月南川柳林下土壤; ▦ 7 月枫杨林下土壤。图柱上标不同小写字母表示不同地块间差异显著 ($P<0.05$)

□ Soil of waste land in March; ▨ *Salix rosthornii* Seemen soil in March; ▩ *Pterocarya stenoptera* soil in March;

▪ Soil of waste land in July; ▧ *Salix rosthornii* Seemen soil in July; ▦ *Pterocarya stenoptera* soil in July.

Lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$) among plots

图 3 三峡库区消落带 2 种树木林下不同土层土壤物理性质的变化

Fig. 3 Change of soil physical properties of different soil layers under 2 kinds of trees in hydro-fluctuation belt

土壤排水能力也是衡量土壤结构功能的重要指标之一。由表 3 可知,3 月,不同土层 3 种土壤排水能力值无显著性差异。7 月,在 0~10 和 10~20 cm 土层,荒地与南川柳林下土壤排水能力值无显著差异,但二者均低于枫杨;在 20~30 cm 土层,荒地与枫杨林下土壤排水能力值无显著差异,但二者显著高于南川柳林下土壤。

3 讨论

三峡蓄水引起的消落带水土流失至少需要 50 年才能稳定,土壤性状将长时间处于不稳定状态^[26]。消落带植被恢复与重建能够加快消落带生态系统稳定的进程。消落带特殊生境对植被适应能

力有极高要求,并且不同植物对土壤的作用不同,因此在进行三峡库区消落带植被恢复与重建时,需要综合考虑植物的适应性与功能性。

水库水位涨落与水浪冲刷侵蚀以及降雨侵蚀,对消落带土壤物理性质影响很大^[27]。长时间淹水会使土壤抗剪强度显著降低,进而出现软化、泥化现象,表层土壤容易流失,深层土壤上移,造成土壤体质量增加,孔隙度、通气度、持水量下降;在消落带出露期,植被生长能逐渐改善土壤物理性质,提高消落带抵御极端天气的能力。

本研究对三峡库区消落带南川柳和枫杨林下土壤及荒地土壤物理性质进行对比分析发现,2 个树种林下土壤较荒地土壤具有较好的物理性质,主要

体现在林下土壤体积质量较低,土壤孔隙度、通气度及持水量较高。说明植被恢复能改善土壤结构,增加土壤通气性、提高土壤持水能力,因此土壤质量得以提高^[27-28]。同样,这也说明在三峡库区消落带进行植被恢复和重建对消落带生态系统具有积极意义。本研究同时发现,2种消落带适生植物林下土壤体积质量、孔隙度和持水量之间存在差异。枫杨林下土壤体积质量较小,平均总孔隙度较大,持水量较大,其毛管孔隙所占比例较高,在降水时能储存更多的水分,并在干旱期能够为植物提供充足的水分;而南川柳相对较紧实的土壤能够更好地支撑自身相对细小的枝干,抗击水浪冲刷,并且相对较大比例的非毛管孔隙说明其具有更好的入渗性,能有效减少地表径流,从而减轻暴雨造成的土壤侵蚀。在3—7月,枫杨林下土壤物理性状有明显提高,而南川柳林下土壤物理性状变化不明显。说明采用不同植物进行植被恢复对土壤质量的改良效果不同^[29-31]。

本研究发现,枫杨单优植物群落和南川柳单优植物群落林下土壤均保持了较适宜植物生长的物理性质,同时也发现二者土壤物理性质之间存在差异。众所周知,库区消落带不仅存在反季节水淹问题,而且还存在土壤有机质含量少、结构差、水稳定性不好、干旱胁迫加剧等一系列生态环境问题。因此,从三峡库区消落带植被恢复的长期性和复杂性,以及从改善和保护消落带土壤质量角度出发,在选取适生植物时,植物对土壤环境的作用效果也应该成为考虑的重要因素之一。本研究结果还需通过深入探讨2种植物对林下土壤化学性质、土壤酶、土壤微生物等的影响来进一步验证,以期库区消落带植被恢复与重建提供新的思考方向。

[参考文献]

- [1] 涂建军,陈治谏,陈国阶,等.三峡库区消落带土地整理利用:以重庆市开县为例[J].山地学报,2002,20(6):712-717.
Tu J J, Chen Z J, Chen G J, et al. A study on land consolidation and utilization of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir: a case study of Kaixian Country, Chongqing City [J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(6): 712-717.
- [2] 吕明权,吴胜军,陈春娣,等.基于文献计量视角的三峡消落带生态系统研究进展[J].生态学报,2015,35(11):1-22.
Lü M Q, Wu S J, Chen C D, et al. A review of studies on water level fluctuating zone(WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) based on bibliometric perspective [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 1-22.
- [3] Peng C R, Zhang L, Qin H J, et al. Revegetation in the water level fluctuation zone of a reservoir: an ideal measure to reduce

- the input of nutrients and sediment [J]. Ecological Engineering, 2014, 71: 574-577.
- [4] Chen C D, Colin Meurk, Chen J L, et al. Restoration design for Three Gorges Reservoir shorelands, combining Chinese traditional agro-ecological knowledge with landscape ecological analysis [J]. Ecological Engineering, 2014, 71: 584-597.
- [5] Shi R J. Ecological environment problems of the Three Gorges Reservoir area and countermeasures [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(B): 1431-1434.
- [6] 熊俊,袁喜,梅朋森,等.三峡库区消落带环境治理和生态恢复的研究现状与进展[J].三峡大学学报(自然科学版),2011,33(2):23-28.
Xiong J, Yuan X, Mei P S, et al. Research status and progress of hydro-fluctuation belt and vegetation recovering of Three Gorges Reservoir Area [J]. J of China Three Gorges Univ (Natural Sciences Edition), 2011, 33(2): 23-28.
- [7] 周明涛,杨平,许文年,等.三峡库区消落带植物治理措施[J].中国水土保持科学,2012,10(4):90-94.
Zhou M T, Yang P, Xu W N, et al. Plant management measures on water-level fluctuating-zone in Three Gorges Reservoir area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(4): 90-94.
- [8] Ali T H, Bjørn K. A sensitivity analysis of lake water level response to changes in climate and river regimes [J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters, 2015, 51: 118-130.
- [9] Holmes P M, Esler K J, Richardson D M. Guidelines for improved management of riparian zones invaded by alien plants in south Africa [J]. South African Journal of Botany, 2008, 74: 538-552.
- [10] 鲍玉海,贺秀斌,钟荣华,等.三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应[J].水土保持研究,2014,21(6):171-180.
Bao Y H, He X B, Zhong R H, et al. Revegetation and its effects on soil reinforcement in the riparian zone of Three-Gorge reservoir [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6): 171-180.
- [11] 苏维词,张军以.河道型消落带生态环境问题及其防治对策:以三峡库区重庆段为例[J].中国岩溶,2010,29(4):445-450.
Su W C, Zhang J Y. The main eco-environmental problems and prevent measures within the watercourse-type fluctuation zone: a case in Chongqing reach of the Three Gorges Reservoir [J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(4): 445-450.
- [12] 周永娟,仇江啸,王姣,等.三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J].生态学报,2010,30(24):6726-6733.
Zhou Y J, Qiu J X, Wang J, et al. Assessment of eco-environmental vulnerability of water-level fluctuation belt in Three-Gorges Reservoir area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6726-6733.
- [13] 李兆佳,熊高明,邓龙强,等.狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力[J].生态学报,2013,33(11):3362-3369.
Li Z J, Xiong G M, Deng L Q, et al. Dynamics of antioxidant enzyme activities in roots of *Cynodon dactylon* and *Hemarthra altissima* recovering from annual flooding [J]. Acta Eco-

- logica Sinica, 2013, 33(11): 3362-3369.
- [14] 李 强, 丁武泉, 朱启红, 等. 三峡库区泥、沙沉降对低位狗牙根种群的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1567-1573.
Li Q, Ding W Q, Zhu Q H, et al. Influence of silt deposition and sand deposition on *Cynodon dactylon* population in low-water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1567-1573.
- [15] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系 [J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5821-5831.
Wang X R, Cheng R M, Xiao W F, et al. Relationship between standing vegetation and soil seed bank in Water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir at the beginning after charging water [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(21): 5821-5831.
- [16] 马利民, 唐燕萍, 张 明, 等. 三峡库区消落区几种两栖植物的适生性评价 [J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1885-1892.
Ma L M, Tang Y P, Zhang M, et al. Evaluation of adaptability of plants in Water-flucuation-zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1885-1892.
- [17] 黄小辉, 刘 芸, 李佳杏, 等. 水分胁迫对三峡库区消落带桑树幼苗生理特性的影响 [J]. 林业科学, 2012, 48(12): 122-127.
Huang X H, Liu Y, Li J X, et al. Effects of water stress on physiological characteristics of mulberry (*Morus alba*) seedlings in the Hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(12): 122-127.
- [18] 李佳杏, 黄小辉, 刘 芸, 等. 模拟三峡库区消落带土壤水分条件下的桑树幼苗生长状况 [J]. 蚕业科学, 2012, 38(2): 210-215.
Li J X, Huang X H, Liu Y, et al. Mulberry seedling growth under virtual soil moisture condition in Hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir area [J]. Science of Sericulture, 2012, 38(2): 210-215.
- [19] 郭泉水, 洪 明, 康 义, 等. 消落带适生植物研究进展 [J]. 世界林业研究, 2010, 23(4): 14-20.
Guo Q S, Hong M, Kang Y, et al. Research development on Hydro-fluctuation belt plants [J]. World Forestry Research, 2010, 23(4): 14-20.
- [20] 刘晓娟, 陈年来, 田 青. 两种类型垫状植物对土壤微环境修饰作用的比较 [J]. 草业学报, 2014, 23(1): 123-130.
Liu X J, Chen N L, Tian Q. Comparison on soil microenvironment modification of two cushion species [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 123-130.
- [21] 朱炜歆, 牛俊杰, 刘 庚, 等. 植被类型对晋西北地区土壤含水量的影响 [J]. 生态科学, 2015, 34(2): 71-75.
Zhu W X, Niu J J, Liu G, et al. The influence of soil moisture content of vegetation in northwest Shanxi province [J]. Ecological Science, 2015, 34(2): 71-75.
- [22] 王尚义, 牛俊杰, 朱炜歆, 等. 晋西北矿区、非矿区不同植被下土壤水分特征 [J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 986-991.
Wang S Y, Niu J J, Zhu W X, et al. Change of soil moisture content under different plant species in mining and non-mining areas in northwest Shanxi province [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 986-991.
- [23] 尹秋龙, 焦菊英, 寇 萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(3): 459-469.
Yin Q L, Jiao J Y, Kou M. The soil moisture characteristics under different vegetation types extremely heavy rainfall on the Hilly-gullied Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3): 459-469.
- [24] 范 莉, 王 勇, 张天宇. 近 50 年重庆市农业气候资源变化特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1): 88-93.
Fan L, Wang Y, Zhang T Y, et al. Analysis of changing characteristics of agricultural climate resources over 50 years in Chongqing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(1): 88-93.
- [25] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 18-20.
Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil chemical analysis and environmental monitoring [M]. Beijing: China Land Press, 2008: 18-20.
- [26] Yang S L, Zhang J, Dai S B, et al. Effect of deposition and erosion within the main river channel and large lakes on sediment delivery to the estuary of the Yangtze River [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: 1-13.
- [27] 康 冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤物理性质 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.
Kang B, Liu S R, Cai D X, et al. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [28] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4306-4316.
Li Y Y, Shao M A, Chen H S, et al. Impacts of vegetation recovery on soil physical properties in the cross area of wind-water erosion [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4306-4316.
- [29] 杨凤群, 齐雁冰, 常庆瑞, 等. 农牧交错地带植被恢复对土壤物理性质的影响 [J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 57-62.
Yang F Q, Qi Y B, Chang Q R, et al. Effect of vegetation recovery on soil physical properties in Agro-pastoral Transitional zone [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(2): 57-62.
- [30] 唐国勇, 高成杰, 李 昆. 植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5157-5167.
Tang G Y, Gao C J, Li K. Effects of vegetation restoration on the amelioration of degraded soil in a dry-hot valley [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5157-5167.
- [31] 王昭艳, 左长清, 曹文洪, 等. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析 [J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 715-724.
Wang Z Y, Zuo C Q, Cao W H, et al. Physical and chemical properties of soils under different vegetation restoration models in red soil hilly region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 715-724.