

大桥水库消落带不同水位高程柳树林地 土壤团聚体组成与分形特征

宋 娇^{1,2}, 郑晓岚^{2,3}, 鲍玉海², 李进林^{2,3}, 韦 杰¹

(1.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331;2.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,
山地表生过程与生态调控重点实验室,成都 610041;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为研究植被恢复对水库消落带土壤团聚体组成及稳定性的影响,利用干筛和湿筛法,测定了大桥水库消落带不同水位高程下柳树林地土壤团聚体成分分布,并基于分形理论分析了土壤团聚体分形特征。结果表明:(1)消落带柳树林地土壤 $>0.25\text{ mm}$ 非水稳定性团聚体和水稳性团聚体分别为 $73.13\%\sim 93.69\%$ 和 $47.62\%\sim 82.06\%$,较对照无植被样地土壤均有所增加,但两者差异不明显;消落带土壤大团聚体含量随水位高程升高而降低,随土层深度增加而减少,但在不同水位高程和不同土层间均无显著性差异($p>0.05$)。(2)消落带柳树林地土壤水稳性团聚体分形维数(D)为 $2.51\sim 2.82$,平均值为 2.67 ,低于对照的 2.75 ;土壤水稳性团聚体分形维数(D)在不同水位高程和不同土层间均无显著性差异($p>0.05$),整体呈现出随水位高程升高而降低的趋势,且 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层 D 值低于 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层。(3)消落带柳树林地土壤MWD、GMD平均值分别为 $0.81, 0.24\text{ mm}$,高于对照的 $0.71, 0.15\text{ mm}$,柳树林地土壤团聚体稳定性高于对照;土壤团聚体稳定性在消落带内部具有一定空间差异,MWD与GMD均表现为高水位($2\ 016\sim 2\ 019\text{ m}$) $>$ 中水位($2\ 010\sim 2\ 013\text{ m}$) $>$ 低水位($2\ 007\text{ m}$),且 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层MWD与GMD大于 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层的,但不同水位高程和不同土层间均无显著性差异($p>0.05$)。综上,大桥水库消落带植被恢复对土壤团粒结构有一定程度改善,且随淹水深度的增加,消落带柳树林地土壤团聚体稳定性降低。

关键词:土壤团聚体;分形特征;柳树林;消落带;大桥水库

中图分类号:S152.4;S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)05-0087-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.013

Composition and Fractal Features of Soil Aggregates in Willow Forest Lands at Different Elevations in the Water Level Fluctuation Zone of the Daqiao Reservoir

SONG Jiao^{1,2}, ZHENG Xiaolan^{2,3}, BAO Yuhai², LI Jinlin^{2,3}, WEI Jie¹

(1.School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

2.Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and

Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to study the effects of vegetation restoration on the composition and stability of soil aggregates in the water-level-fluctuation zone, dry screening and wet screening methods were used to determine the composition and distribution of soil aggregates in willow forest under different water levels and elevations in the water-level-fluctuation zone of Daqiao Reservoir, and fractal characteristics of soil aggregates were analyzed based on fractal theory. The results showed as follows: (1) The contents of non-water-stable aggregates and water-stable aggregates that greater than 0.25 mm in willow forest land in the water-fluctuation zone were $73.13\%\sim 93.69\%$ and $47.62\%\sim 82.06\%$, respectively, which were higher than those of control plots without vegetation, but the difference between them was not significant. The content of macro-aggregates in water-level-fluctuation zone decreased with the increasing of water level elevation and depth of soil layer, however, there was no significant difference between different water levels and soil layers ($p>0.05$).

收稿日期:2021-04-21

资助项目:国家自然科学基金项目(41977075);国家自然科学基金联合基金项目(U2040207);重庆英才计划项目(CQYC201905009);重庆市教委科技重点项目(KJZD-K201800502)

第一作者:宋娇(1996—),女,四川峨眉山人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:18483223398@163.com

通信作者:鲍玉海(1981—),男,山东成武人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:byh@imde.ac.cn

(2) The fractal dimension (D) of soil water-stable aggregates in willow forest in the water-level-fluctuation zone ranged from 2.51 to 2.82, with an average of 2.67, which was lower than that of the control (2.75). The fractal dimension (D) of soil water-stable aggregates showed no significant difference between different water level elevations and different soil layers ($p > 0.05$), and it decreased with the increasing of water level, and the D value of 0—10 cm soil layer was lower than that of 10—20 cm soil layer. (3) The average values of soil MWD and GMD of willow forest in water-level-fluctuation zone were 0.81 and 0.24 mm, respectively, which were higher than those of the control (0.71 and 0.15 mm). The stability of soil aggregates in willow forest was higher than control. The stability of soil aggregates had a certain spatial difference in the water-level fluctuation zone. Both MWD and GMD followed the order of high water level (2 016 ~ 2 019 m) > medium water level (2 010 ~ 2 013 m) > low water level (2 007 m), and the MWD and GMD in the 0—10 cm soil layer were both greater than those in the 10—20 cm soil layer. However, there was no significant difference between different water levels and different soil layers ($p > 0.05$). In conclusion, vegetation restoration in the water-level-fluctuation zone of Daqiao Reservoir could improve soil aggregate structure to a certain extent, and the stability of soil aggregate in willow forest land in the water-level-fluctuation zone decreased with the increasing of flooding depth.

Keywords: soil aggregate; fractal feature; willow forest; water level fluctuation zone; Daqiao Reservoir

土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[1-3],土壤团聚体组成与稳定性成为评价区域土壤生态功能价值的重要依据^[4]。已有学者^[5-13]对土壤团聚体开展了大量研究,形成了较为系统的研究方法,并在不同植被类型、土地利用方式、水土保持措施及干湿交替等对团聚体组成特征及其稳定性的影响方面取得了显著成果,国内研究对象主要集中在西北黄土高原、南方红壤区、北方土石山区等陆地土壤,但有关大型水库消落带这一极端干湿交替环境下的土壤团聚体组成及稳定性的研究较为缺乏,少量探索性研究^[14]表明,周期性极端反季节性高压淹水与高温出露交替会引起大型水库消落带土壤结构和团聚体特征改变,导致土壤侵蚀加剧。而植被恢复能够有效改善土壤团粒结构,尤其是改善土壤水稳性团聚体数量,从而提高土壤生态功能价值^[5]。

大桥水库是冕宁县城和西昌市城市供水重要水源地,大桥水库消落带与国内其他水电开发水库的消落带一样面临着植被消亡演替、生态系统受损、土壤侵蚀加剧等生态环境问题,无法发挥其应有的生态缓冲功能,从而影响水库库岸稳定、水质安全和生态景观。当前针对大桥水库消落带的研究主要集中在地质灾害防治、边坡稳定、土地利用与植被重建等方面^[15-16],而针对大桥水库消落带植被恢复对土壤团聚体组成特征及其稳定性影响的研究尚不多见。基于此,本文以大桥水库典型植被恢复消落带为研究对象,采用干筛法和湿筛法研究消落带不同水位高程土壤团聚体组成和分形特征,分析柳树种植对消

落带土壤团粒结构的影响,为消落带植被恢复及管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大桥水库位于四川省冕宁县境内雅砻江支流安宁河的上游,以灌溉、工业及生活供水为主,兼顾发电、防洪、水产养殖和旅游等作用,是冕宁县和西昌市城市供水重要水源地,其控制流域面积 796 km²,库容 6.58 亿 m³^[15],水位变化在 1 975~2 020 m,形成落差 45 m,面积 7.5 km²的土质消落带。根据凉山州大桥水电开发总公司提供的 2002—2012 年水库历史水位调度数据,大桥水库每年 6—10 月开始逐步蓄水至 2 020 m 以便发电,翌年 1—6 月逐步回落,历史水位变化与消落带出露情况见图 1。自 2004 年起,大桥水库最低水位控制在 1 980 m 左右,整个消落带年均出露天数约在 5~278 天。由于消落带生境脆弱,自 2015 年起大桥水电开发总公司在水位高程 2 006~2 020 m 地区开展人工种植柳树试验,但尚未系统开展植被恢复的水土保持效益评估。

研究区域位于四川省凉山州冕宁县大桥镇(28°45′17″N,102°08′59″E),属亚热带季风气候区,年均气温 16~17℃,年均降水量 1 000~1 100 mm,雨热同期,年日照时间 1 600~1 800 h;地处青藏高原东侧,属横断山脉山区,海拔 2 050 m,土壤类型以红壤、黄棕壤、紫色土为主,pH 为 5.51~6.12,土地利用主要为荒草地和裸地。由于水库运行原生植被几乎破坏殆尽,现有植被以人工种植柳树(*Salix matsudana*)以及自然恢复草

本植物狗牙根(*Cynodon dactylon*)为主。

1.2 样地选取及样品采集

2019 年 6 月,在大桥水库消落带分别选取 2 007,2 010,2 013,2 016,2 019 m 水库水位高程的人工种植柳树林地,布设 2 m×10 m 的采样样方,以“S”形五点取样法分别采集 0—10,10—20 cm 土层土壤样品,并以消落带无植被裸地为对照。由于大桥水库消落带自然恢复造成裸地呈斑块状分布,而每个

高程不能找到完全与之对应的无植被对照样地,因此在柳树林地周边相同地形和土壤类型的消落带选取水位高程不等的裸露地块,以 2 007 m 水位高程处的裸地为起点,向 2 019 m 水位高程处依次分层采样,将 2 008,2 013,2 015,2 018 m 4 个水位高程各裸地的土壤样品混合作为对对照样。所有土壤样品均装入密封袋带回实验室,除去土样中杂质后自然风干,测定土壤理化性质。

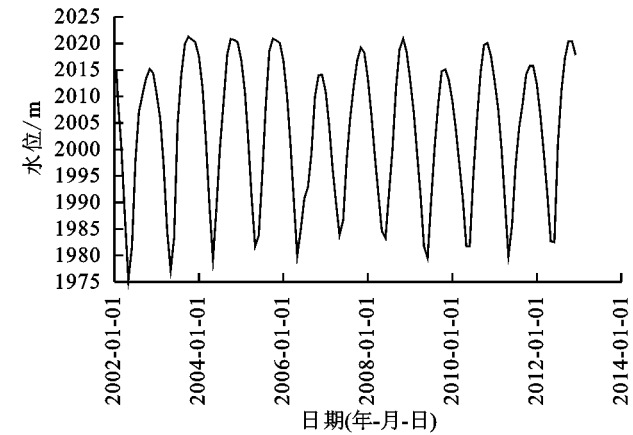
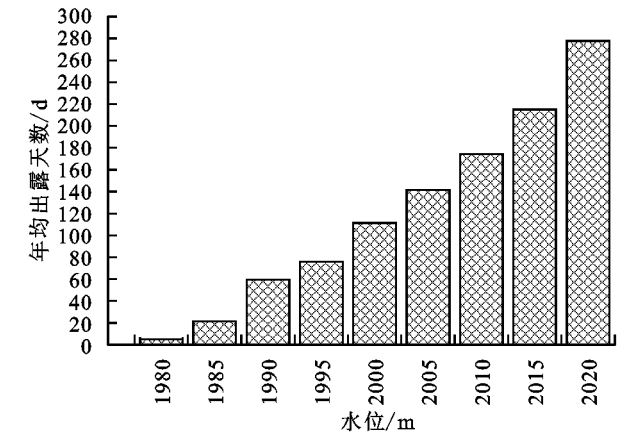


图 1 大桥水库历史水位运行节律及不同水位高程出露



1.3 土壤团聚体组成测定

用干筛法测定土壤非水稳性团聚体组成:将风干土样称重,倒入孔径(5,3,2,1,0.5,0.25 mm)大小组合好的套筛中手动振荡套筛,待各粒径团聚体筛到对应筛子中后取出进行称重并计算各粒径团聚体所占比重。用湿筛法测定土壤水稳性团聚体,把干筛后的非水稳性团聚体按比例配成 50 g 土样,每个样品重复 3 次,配置好的土样放入土壤团粒结构分析仪按孔径大小套好的筛组中,筛桶中注入没过筛组顶部约 5 cm 左右的水,振荡 30 min 后将各级筛中团聚体洗入铝盒,烘干后称重,计算土壤水稳性团聚体组成。

1.4 土壤团聚体稳定性指标计算

土壤平均直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标,其计算公式^[10]为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \tag{1}$$

$$GMD = \exp(\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i) \tag{2}$$

式中: x_i 为土壤各粒径平均直径(mm); w_i 为土壤各粒径质量百分比(%)。

土壤分形维数计算采用杨培岭等^[6]提出的模型:
 $(3-D) \lg(\overline{x_i}/x_{\max}) = \lg(w(\delta < x_i)/w_0)$ (3)
式中: D 为分形维数; x_i 为土壤各粒径平均直径(mm); $x_{\max}$ 为最大粒径平均直径(mm); $w(\delta < x_i)$ 为小于某一粒径土粒质量(g); w_0 为土粒总质量(g)。

分别以 $\lg(x_i/x_{\max})$ 和 $\lg(w(\delta < x_i)/w_0)$ 为横、纵坐标绘图,(3- D)即为拟合直线回归方程斜率,由此得出土壤分形维数 D 。

1.5 数据处理

通过 Excel 2019 软件对数据进行整理,利用 SPSS 21.0 软件进行土壤团聚体分形维数线性方程拟合、土壤团聚体与分形特征 Pearson 相关分析以及对各指标的差异性分析,统计图均用 Origin 2017 制作。

2 结果与分析

2.1 土壤非水稳性大团聚体组成及分形特征

由表 1 可知,不同水位高程消落带植被恢复下土壤非水稳性团聚体以<5 mm 粒径为主,含量达 98% 以上,其中各样地 1~2 mm 粒径团聚所占比例最大,为 27.10%~39.92%,>5 mm 粒径团聚体占比最少,为 0.21%~1.28%。总的来看,消落带柳树林地土壤非水稳性大团聚体(粒径≥0.25 mm)含量较高,为 73.13%~93.69%,大部分样地含量在 80% 左右。除 2 007 m 处样地外,其余各样地的土壤非水稳性大团聚体均小于对照。土壤非水稳性大团聚体土层间差异不显著($p>0.05$)且无明显相关性($R^2<0.9$),而>5 mm 粒径团聚体含量随着土层深度增加而增加,除 2 007 m 高程处 2~3,0.25~0.5,<0.25 mm 3 个粒级土层差异较大外,其余样地的各粒径土层间差异较小。随消落带样地水位高程的升高,1~3 mm 粒径团聚体比重呈较稳定下降趋势,非水稳性大团聚

体含量有一定程度减少,其他粒径团聚体含量变化不明显。不同水位高程样地土壤非水稳性团聚体分形维数计算的线性方程拟合优度均大于 0.939,说明它们具有统计学意义上的自相关性,各水位高程 D 值在 2.05~2.48(表 1),但沿水位高程和土层上的空间差异不显著($p>0.05$)。2 007 m 水位高程处最大,2 019 m 水位高程处最小。

2.2 土壤水稳性团聚体组成及分形特征

由表 2 可知,大桥水库消落带不同水位高程土壤水稳性团聚体组成以<1 mm 粒径团粒为主,比例在 62.67%~87.18%,其中又以<0.25 mm 粒径微团聚

体比重最高,除 2 016 m 水位高程样地外,其余样地微团聚体含量均占 29.85%以上,>5 mm 粒径水稳性团聚体几乎没有。从土层深度(表 2)看,土层间水稳性大团聚体具有显著的相关性($R^2>0.9$),其含量变化差异不显著($p>0.05$),总体表现为 0—10 cm 土层含量略高于 10—20 cm 土层。从水位高程看,各粒级的水稳性团聚体组成变化不明显,水稳性大团聚体含量随水位高程升高有一定程度的增加但各水位高程间差异不显著($p>0.05$)。消落带土壤水稳性大团聚含量在 47.62%~82.06%,显著低于消落带的土壤非水稳性大团聚体含量($p<0.05$)。

表 1 土壤非水稳性团聚体组成及分形维数

水位/m	土层 深度/cm	土壤非水稳性团聚体组成/%							D	R^2
		>5 mm	3~5 mm	2~3 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm		
2007	0—10	0.21	11.70	21.50	39.92	11.08	9.28	6.31	2.05	0.985
	10—20	0.41	11.08	8.68	34.52	12.63	16.33	16.33	2.34	0.963
2010	0—10	0.36	8.35	10.53	30.73	15.21	17.66	17.16	2.35	0.955
	10—20	0.56	7.42	7.33	34.43	12.79	18.52	18.95	2.38	0.951
2013	0—10	0.79	8.37	9.16	31.35	11.45	17.36	21.52	2.42	0.955
	10—20	0.81	10.94	9.32	30.06	13.98	18.64	16.25	2.34	0.953
2016	0—10	0.39	11.31	6.90	31.82	14.44	19.29	15.86	2.34	0.949
	10—20	1.28	11.48	8.18	30.84	12.56	18.08	17.59	2.34	0.955
2019	0—10	0.40	8.57	5.80	27.10	12.81	18.44	26.88	2.48	0.939
	10—20	0.96	11.70	8.18	28.71	13.83	17.88	18.75	2.38	0.954
对照	0—10	0.49	10.69	10.64	35.27	12.07	14.48	16.35	2.33	0.971
	10—20	0.22	10.03	9.72	33.87	12.06	15.38	18.71	2.37	0.966

土壤水稳性团聚体分形维数计算的线性方程拟合较好,拟合优度在 0.89 以上,大部分高于 0.9(表 2),说明它们具有统计学意义上的自相关性,具有随机分形结构。不同水位高程柳树林地土壤水稳性团聚体分形维数分布在 2.51~2.82,总体变化幅度小,土层间差异不显著($p>0.05$),较非水稳性团聚体组

成分形维数均有一定幅度的增加。从表 2 还可以看出,<0.25 mm 土壤水稳性团聚体粒径含量越高,分形维数越大,这与封磊等^[17]研究结果一致。此外各土层间分形维数差异较小,变化趋势不明显,随着样地水位高程的升高水稳性团聚体分形维数有一定下降的趋势。

表 2 土壤水稳性团聚体组成及分形维数

水位/m	土层 深度/cm	土壤水稳性团聚体组成/%							D	R^2
		>5 mm	3~5 mm	2~3 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm		
2007	0—10	0	3.19	6.21	13.22	16.25	13.27	47.87	2.77	0.924
	10—20	0	1.92	3.56	7.34	17.18	17.62	52.38	2.82	0.914
2010	0—10	0	2.56	5.44	11.32	24.60	19.50	36.58	2.72	0.914
	10—20	0	1.28	3.50	10.88	24.78	20.38	39.18	2.74	0.890
2013	0—10	0	2.74	7.28	16.98	25.92	16.32	30.76	2.65	0.933
	10—20	0	1.66	5.38	15.64	25.36	19.42	32.54	2.68	0.914
2016	0—10	0	5.84	9.53	16.60	32.87	17.23	17.94	2.52	0.920
	10—20	0	5.48	10.39	21.46	28.20	16.27	18.19	2.51	0.939
2019	0—10	0	4.74	7.38	14.28	24.14	17.02	32.44	2.67	0.943
	10—20	0.07	5.73	6.77	13.52	24.73	19.31	29.85	2.66	0.936
对照	0—10	0	2.07	6.46	15.83	14.35	19.59	41.71	2.75	0.954
	10—20	0	2.12	6.55	13.48	20.70	14.15	43.01	2.74	0.947

2.3 大桥水库消落带土壤团聚体分布规律

由大桥水库消落带各样地土壤非水稳性和水稳性团聚体平均含量分布(表 3)可知,粒径>1 mm 范围内非水稳性含量明显高于水稳性含量,而粒径<1 mm 含量情况则相反,总体来看非水稳性大团聚体含量明显高于水稳性大团聚体含量,在粒径 1~2 mm 的 2 类团聚体含量差异最大,>5 mm 粒径差异最小。随水位高程的上升,非水稳性大团聚体含量有所减少,水稳性大团聚体

含量有所增加但在 2 016 m 水位高程处达到峰值。与对照地相比,大部分水位高程样地土壤非水稳性和水稳性大团聚体含量一定程度上高于对照样地,说明植被对土壤结构有一定程度的改善作用。研究表明,并非所有样地大团聚体含量均高于对照地,可能原因:其一,由于实地环境限制,对照地采样方法上对结果产生一定的影响;其二,大桥库区消落带植被恢复年限较短,植被对土壤结构改善作用尚未完全发挥。

表 3 各样地土壤团聚体含量

水位/m	土壤非水稳性与水稳性团聚体粒径组成/%													
	>5 mm		3~5 mm		2~3 mm		1~2 mm		0.5~1 mm		0.25~0.5 mm		<0.25 mm	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
2007	0.31	0	11.39	2.56	15.09	4.88	37.22	10.28	11.85	16.71	12.81	15.44	11.32	50.12
2010	0.46	0	7.88	1.92	8.93	4.47	32.58	11.10	14.00	12.30	18.09	19.94	18.05	37.88
2013	0.80	0	9.66	2.20	9.24	6.33	30.70	16.31	12.71	25.64	18.00	17.87	18.88	31.65
2016	0.40	0	11.39	3.75	7.54	9.96	31.33	19.03	13.50	30.53	18.68	16.75	16.72	18.07
2019	0.68	0.04	10.14	5.24	6.99	7.08	27.90	13.90	13.32	24.44	18.16	18.17	22.81	31.15
对照	0.36	0	10.36	2.09	10.18	6.50	34.57	14.65	12.06	17.52	14.93	16.87	17.53	42.36

注:a 表示非水稳性团聚体;b 表示水稳性团聚体。

2.4 大桥水库消落带土壤团聚体稳定性分析

土壤团聚体平均重量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标,其值越大表示团聚体平均直径团聚度越高,稳定性越强^[18]。由图 2 可知,大桥水库消落带岸坡土壤团聚体 MWD 与 GMD 均较小,非水稳性团聚体稳定性指标值分别在 1.12~1.74,0.38~1.72 mm,水稳性团聚体分别在 0.54~1.10,0.09~0.49 mm,可以看出,大桥水库消落带土壤团聚体稳定性总体上较差。由表 4 可知,不同土层间土壤非水稳性团聚体的 MWD 与 GMD 值均无显著相关性且差异不显著($p>0.05$),而土壤水稳性团聚体的 MWD 与 GMD 值均显著相关($R^2>0.9$),但土层间无显著性差异($p>0.05$)。对

照无植被淹水荒地其 0—10 cm 土层与 10—20 cm 土层 MWD 与 GMD 值差异最小,在水位高程 2 007~2 013 m 地区,0—10 cm 土层的 MWD 与 GMD 均大于 10—20 cm 土层,而在 2 013~2 019 m 则相反,说明淹水时长对土壤质地结构有一定影响。

总体来看,消落带土壤非水稳性团聚体稳定性指数均高于水稳性团聚体稳定性指数。在水位高程 2 007~2 013 m,0—10 cm 土层的 MWD 与 GMD 值均高于 10—20 cm 土层,水位高程越低差值越大,到了 2 016 m 高程后则相反,且土层间差值有逐渐减小并趋于相同的趋势,这同样说明淹水时长对土壤团聚体稳定性在土层深度上的分布有一定的影响。

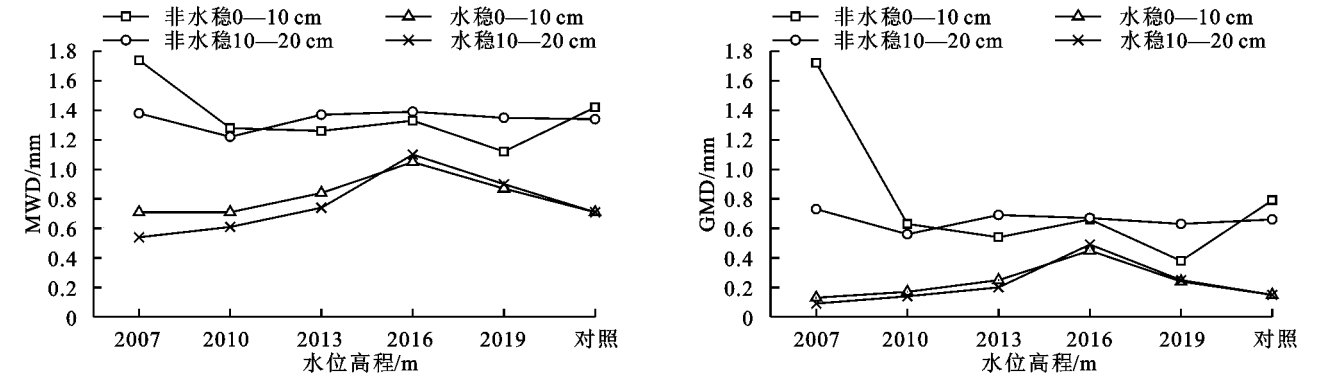


图 2 土壤团聚体稳定性指数沿水位高程和土层深度的变化

3 讨论

本研究表明,大桥水库消落带土壤干筛团粒组成主要以<5 mm 粒径团聚为主,比例达到 98%以上,而湿筛团聚体主要以<3 mm 粒径为主,为 94.16%~

98.72%,>5 mm 粒径团聚体几乎没有,这与张淑娟等^[14]研究得出的规律有所偏差。张淑娟等^[14]对三峡库区消落带不同高程处土壤团聚体的研究表明,土壤非水稳性团聚体组成以>5 mm 粒径团粒为主,比

例达到 60% 以上,湿筛后 >5 mm 粒径土壤团聚体随水位高程的增加而增加,最低含量在 10% 以上,最高达到 70%。造成消落带土壤团粒结构规律差异较大原因之一可能是土壤类型的差异。三峡水库消落带土壤类型为紫色土,本研究所采取的大桥水库土样为山地黄棕壤,紫色土成土速度快、发育慢,土壤肥沃含有丰富的营养物质和矿物质^[19],因此土壤单粒间有机无机胶体黏结作用强,土壤团粒结构较好^[4]。而黄棕壤肥力条件、矿物质含量等均不如紫色土,其土壤团粒结构也较紫色土稍差。

表 4 土层间各指标显著性分析

指标	相关系数	相关系数(sig)	样本检验(<i>t</i>)	样本检验(<i>p</i>)
非水稳性大团聚体	0.426	0.400	0.160	0.879
水稳性大团聚体	0.986	0	1.343	0.237
非水稳性 <i>D</i>	0.462	0.365	-0.526	0.621
水稳性 <i>D</i>	0.976	0.001	-1.115	0.315
非水稳性 MWD 值	0.272	0.602	0.201	0.849
非水稳性 GMD 值	0.613	0.196	0.710	0.505
水稳性 MWD 值	0.947	0.004	1.353	0.234
水稳性 GMD 值	0.980	0	0.830	0.443

注:*p*<0.05 表示差异显著。

淹水情况对土壤团聚体组成有较大影响,陆铸畴等^[20]研究表明,水位升降使得土壤孔隙中气泡爆破产生消散作用,从而对团聚体结构造成破坏。本研究表明,随着大桥水库水位高程的降低,消落带土壤 >5, <0.25 mm 非水稳性团聚体含量减少,而 <0.25 mm 水稳性微粒团聚体含量有一定程度的增加。这可能是由于消落带长时间淹水使土壤软化、泥化,通气度与孔隙度显著下降,进一步引发了土壤团聚体崩解^[21],而不同水位高程的淹水时长又有较大区别,大桥水库 2 007 m 水位高程处淹水时间长达 200 多天,2 019 m 水位高程处只有 100 天左右,这就造成土壤团聚体组成特征沿水位高程的空间分布差异。另外,消落带淹水时长与淹水深度的增加使得土壤受到的水柱压力逐渐增大,造成水库水体对土壤的压实与固结作用在不同水位高程上具有明显差异^[22],使得大桥水库消落带低水位高程处的土壤质地更为黏重紧实,而土壤紧实程度与土壤粒径分布的分形维数呈正相关^[6],导致大桥水库消落带土壤水稳性团聚体分形维数随水位高程降低而增加。此外,张淑娟等^[22]研究表明,对照地土壤微粒团聚体最小,本研究则未得到相同的结论,其原因可能是对照地类型的差异以及本研究对照地采样方式上的特殊性,大桥水库对照样地为无植被的荒地,没有植物对土壤结构进行改善,

因此其土壤团粒结构并不理想。

土壤水稳性团聚体是评价土壤可蚀性的重要指标^[23],早在 1993 年有学者^[24]提出 >0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量是反映土壤抗蚀性的最佳指标,同时也是评价植被恢复下土壤生态效益的指标,其含量越高,生态效益越好^[4]。大桥水库消落带植被恢复下的土壤水稳性大团聚体含量在 47.62%~82.06%,而对照地含量在 56.99%~58.29%,除 2 007 m 高程处水稳性大团聚体含量小于对照地外,其余各样地均高于对照地,但增幅不大,原因可能是 2 007 m 受水淹时长最久,团聚体破坏最严重,且人工种植柳树年限较短,植物根系尚不发达,覆盖率不高。试验^[25]表明,植被恢复可以明显增加水稳性团聚体含量,通过增加土壤中有机质含量,提高土壤颗粒间胶结力,促进大团聚体形成,从而改善土壤结构,提高土壤生态功能效益。

4 结 论

(1)大桥水库消落带土壤结构稳定性较差,表现为水稳性大团聚体含量较少,且团聚体分形维数(*D*)较高,土壤稳定性指数 MWD 与 GMD 值较小,土壤结构较紧实,土层间土壤结构与稳定性差异不大。

(2)人工栽种柳树后对土壤结构与稳定性有一定改善,表现为柳树样地的大团聚体平均值高于对照样地,分形维数(*D*)低于对照地,土壤稳定性指数 MWD 与 GMD 略高于对照地。

(3)样地水位高程越低,土壤大团聚体含量越少,分形维数(*D*)越高,土壤团粒结构与稳定性越差,这与消落带不同水位高程的淹水情况(淹水时长、水柱压力)差异有一定关系。

参考文献:

[1] 赵鹏,史东梅,赵培,等.紫色土坡耕地土壤团聚体分形维数与有机碳关系[J].农业工程学报,2013,29(22):137-144.

[2] 侯高礼.土壤团粒结构及其促进形成[J].西北园艺(果树),2013(1):52-53.

[3] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.

[4] 王铁浩,耿养会,黄仲华.三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征[J].生态学报,2013,33(18):5493-5499.

[5] 赵世伟,苏静,杨永辉,等.宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2005,12(3):27-28,69.

[6] 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.

[7] Guo Y F, Fan R Q, Zhang X P, et al. Tillage-induced

effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure[J].*Science of the Total Environment*,2020,703:e134617.

[8] Guo L K, Shen J, Li B, et al. Impacts of agricultural land use change on soil aggregate stability and physical protection of organic C[J].*Science of the Total Environment*,2020,707:e136049.

[9] 魏守才,谢文军,夏江宝,等.盐渍化条件下土壤团聚体及其有机碳研究进展[J].*应用生态学报*,2021,32(1):369-376.

[10] 吴梦瑶,陈林,庞丹波,等.贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J].*水土保持学报*,2021,35(2):210-216.

[11] 朱元皓,黄云,盛储望,等.赣南经济林种植对土壤团聚体及有机碳的影响[J].*环境科学与技术*,2020,43(5):213-220.

[12] 甘凤玲,王涛,何丙辉,等.汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征[J].*水土保持研究*,2018,25(1):84-91.

[13] 张强,周正朝,姚小萌.植被恢复过程中土壤团聚体分形特征研究[J].*河南科学*,2017,35(1):94-100.

[14] 张淑娟,贺秀斌,鲍玉海,等.三峡水库消落带不同水位高程土壤团聚体变化特征[J].*水土保持研究*,2021,28(1):25-30.

[15] 雷蕾,谢新生,雷庆.浅谈大桥水库主坝坝体变形反演分析[J].*地下水*,2017,39(6):104-105.

[16] 鲍玉海,郭丰,胡保生,等.西南干旱河谷区水库消落带柳树造林效果评价[J].*水土保持研究*,2018,25(5):216-219.

[17] 封磊,洪伟,吴承祯,等.杉木—观光木混交林不同经营模式土壤团粒结构的分形特征[J].*山地学报*,2004,22(3):315-320.

[18] 陈正发,史东梅,谢均强,等.紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响[J].*中国农业科学*,2011,44(13):2721-2729.

[19] He X B, Bao Y H, Nan H W, et al. Tillage pedogenesis of purple soils in southwestern China[J].*Journal of Mountain Science*,2009,6(2):205-210.

[20] 陆铸畴,包忻怡,Liu X,等.应用 Le Bissonnais 法研究三峡库区消落带土壤水稳性团聚体稳定性[J].*灌溉排水学报*,2018,37(5):115-120.

[21] 邬静淳,欧阳,熊兴政,等.三峡库区消落带 2 种树木林下土壤的物理性质比较[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2017,45(4):157-164.

[22] 张淑娟,贺秀斌,鲍玉海,等.三峡水库消落带土壤团聚体微结构变化特征[J].*山地学报*,2020,38(3):360-370.

[23] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].*土壤学报*,2008,45(5):802-809.

[24] 丁文峰,李占斌.土壤抗蚀性的研究动态[J].*水土保持科技情报*,2001(1):36-39.

[25] 区晓琳,陈志彪,姜超,等.植被恢复对亚热带侵蚀红壤团聚体养分分布的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(6):230-238.

(上接第 86 页)

[13] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等.降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J].*生态学报*,2016,36(8):2264-2273.

[14] 刘警鉴,卢远,刘斌涛,等.广西壮族自治区土地利用与土壤侵蚀的关系[J].*水土保持通报*,2018,38(1):41-46.

[15] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J].*Journal of the American Society of Agronomy*,1936,28(5):337-351.

[16] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J].*European Journal of Soil Science*,1996,47(4):425-437.

[17] 闫峰陵,李朝霞,史志华,等.红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J].*农业工程学报*,2009,25(3):37-41.

[18] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012.

[19] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J].*土壤学报*,1997,34(4):359-366.

[20] 侯春霞,骆东奇,谢德体,等.不同利用方式对紫色土团聚体形成的影响[J].*西南农业大学学报(自然科学版)*,2003,25(5):467-470.

[21] 陈正发,夏清,史东梅,等.基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J].*水土保持学报*,2011,25(4):6-11.

[22] 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*,2013,33(18):5589-5598.

[23] Denef K, Six J. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy[J].*European Journal of Soil Science*,2010,57(6):774-786.

[24] 谢贤健,张继.巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J].*水土保持学报*,2012,26(6):175-179.