

文章编号: 1008-2786-(2020)3-360-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000516

三峡水库消落带土壤团聚体微结构变化特征

张淑娟^{1,2}, 贺秀斌^{1*}, 鲍玉海¹, 唐 强¹

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 三峡水库落差 30 m 的反季节水文节律使消落带的地形、植被和土壤发生了巨大变化, 特别是土壤团聚体微结构对干湿交替作用极为敏感。为了明确三峡水库消落带水位周期性涨落对土壤团聚体微结构的影响, 采集消落带 145 ~ 155 m、155 ~ 165 m、165 ~ 175 m 的表层土壤, 以未淹水高程 180 m 的土壤为对照, 采用同步辐射显微 CT 及图像处理技术, 对土壤团聚体微结构变化特征进行分析。结果表明: (1) 团聚体孔隙度随水位高程的降低而显著降低, 与 180 m 的孔隙度相比, 165 ~ 175 m、155 ~ 165 m 和 145 ~ 155 m 的孔隙度依次降低了 21.80%、47.68% 和 59.58%; 孔隙数量和孔隙节点数量随水位高程的降低显著减少, 最大降幅分别为 56.64% 和 91.18%; 孔隙分形维数随水位高程降低而降低, 欧拉值则随水位高程的降低而增大; (2) 团聚体孔隙度以 > 100 μm 的通气孔隙度为主, 随着水位高程的降低, 通气孔隙度逐渐降低, 而 < 30 μm 的贮存孔隙度和 30 ~ 100 μm 的毛管孔隙度先增加后降低; (3) 团聚体孔隙形状以瘦长型孔隙为主, 随着水位高程的降低, 瘦长型孔隙占孔隙度的百分比显著降低, 而规则孔隙和不规则孔隙占孔隙度的百分比显著增加。三峡水库消落带水位周期性涨落对团聚体孔隙数量、大小分布、形状特征等影响显著, 团聚体孔隙特征参数随水位高程的变化, 主要受淹水时间、淹水深度和干湿交替等因素的影响。研究结果可为三峡水库消落带土壤抗蚀能力及岸坡稳定性评价提供依据。

关键词: 团聚体; 微结构; 同步辐射显微 CT; 消落带; 三峡水库

中图分类号: S152.4

文献标志码: A

土壤结构决定着土壤中水、肥、气、热的贮存和运移, 直接影响着土壤的其他物理、化学和生物过程, 是土壤功能的基础。团聚体是土壤结构的基本单元, 其包含不同粒级的固体颗粒和许多大小、形状不同的孔隙, 影响着土壤渗透性和抗蚀性^[1-3]。由于研究方法的局限性, 过去对团聚体的研究主要集中在团聚体颗粒组成、分布及稳定性方面, 而忽略了团聚体微结构特别是孔隙结构的研究, 难以体现团聚体内部结构的差异^[4]。近年来, 作为一种快速、

高精度且不破坏样品的探测技术, CT 技术为土壤内部三维结构透视及其定量分析提供了重要手段^[5-6], 尤其是同步辐射显微 CT 具有较高的分辨率, 可以对团聚体进行扫描, 结合数字图像处理技术能够定量分析团聚体微结构特征。目前, 国内外学者应用同步辐射显微 CT 对不同植被恢复模式、不同耕作措施、不同干湿交替作用和不同冻融循环下团聚体微结构特征进行了研究^[7-11], 表明同步辐射显微 CT 技术作为研究团聚体微结构的有效技术手

收稿日期 (Received date): 2019-04-27; **改回日期** (Accepted date): 2020-04-26

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41771321, 41771320, 41571278)。[National Natural Science Foundation of China (41771321, 41771320, 41571278)]

作者简介 (Biography): 张淑娟 (1989-), 女, 山东单县人, 博士研究生, 主要研究方向: 土壤结构与水土保持。[ZHANG Shujuan (1989-), female, born in Shanxian, Shandong province, Ph. D. candidate, research on soil structure and soil and water conservation] E-mail: zsj0816@126.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 贺秀斌 (1967-), 男, 陕西镇安人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。[HE Xiubin (1967-), male, born in Zhenan, Shanxi province, Ph. D., professor, specialized in soil erosion and soil and water conservation] E-mail: xiubinh@imde.ac.cn

段,极大地促进了团聚体微结构的研究。

三峡水库采取旱季高水位(175 m)、雨季低水位(145 m)的运行模式,形成水位落差为30 m、总面积达349 km²的消落带,其中72%为土质消落带。与其他自然消落带相比,三峡水库消落带具有淹水时间长、水位变幅大、夏季出露、冬季淹没的反枯洪节律的特点。在周期性水位涨落作用下,消落带土壤组成及结构发生巨大变化,改变土壤可蚀性,导致消落带土体失稳和土壤侵蚀加剧。过去对三峡水库消落带的研究主要集中在生态环境问题(水环境污染、土壤环境恶化、地质灾害加剧、生物多样性锐减等)、生态恢复与重建、开发利用与保护等方面^[12-14]。近年来,消落带土壤结构的研究引起了研究者的重视^[15-18],但目前的研究多集中在大、中尺度,微观尺度的研究不足,特别是利用同步辐射显微CT对周期性水位涨落作用下消落带团聚体微结构的研究鲜有报道。基于此,本文采用同步辐射显微CT和数字图像处理技术对消落带不同水位高程土壤团聚体微结构进行定量研究,探讨消落带周期性淹水一出露交替对团聚体微结构的影响,以期对消落带土壤抗蚀能力及岸坡稳定性评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区腹心地带重庆市忠县石宝

镇(107°32'~108°14'E, 30°03'~30°35'N)(图1),境内溪河纵横,低山起伏,属典型的中低山丘陵地貌^[19]。气候属于暖湿亚热带季风气候,日照时间较长,年均气温为18.2℃,年均降水量为1172.1 mm,降雨多集中在5月—9月^[17]。区域内出露岩层以中生界侏罗系中统沙溪庙组砂泥岩为主,土壤以紫色土为主,在中国土壤系统分类中属于正常新成土,结构水稳性较差,遇水极易分散、崩解,为易蚀性土壤^[20]。由于在消落带形成初期进行了人为清库,再加上初期淹水的影响,消落带植被基本上均为草本植物,植被类型主要为狗牙根(*Cynodon dactylon*)、牛鞭草(*Hemarthria altissima*)、双穗雀稗(*Paspalum paspaloides*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等^[17]。

1.2 土壤样品采集

2016年9月水库水位为145 m左右时,在石宝镇共和村消落带布设3条与库岸垂直的样带进行采样。为降低土地利用、地形地貌、植被、土壤等对研究结果的影响,本文选取淹水前为旱地、淹水后植被为狗牙根、覆盖度为63%~72%、坡度为3°~8°的缓坡型草地为样地采集紫色土样品。根据消落带不同水位高程土壤淹水时间和深度的不同(图2),将消落带划分为低水位高程(LE,145~155 m)、中水位高程(ME,155~165 m)和高水位高程(HE,165~175 m),LE、ME和HE的淹水年限分别为10、8~10

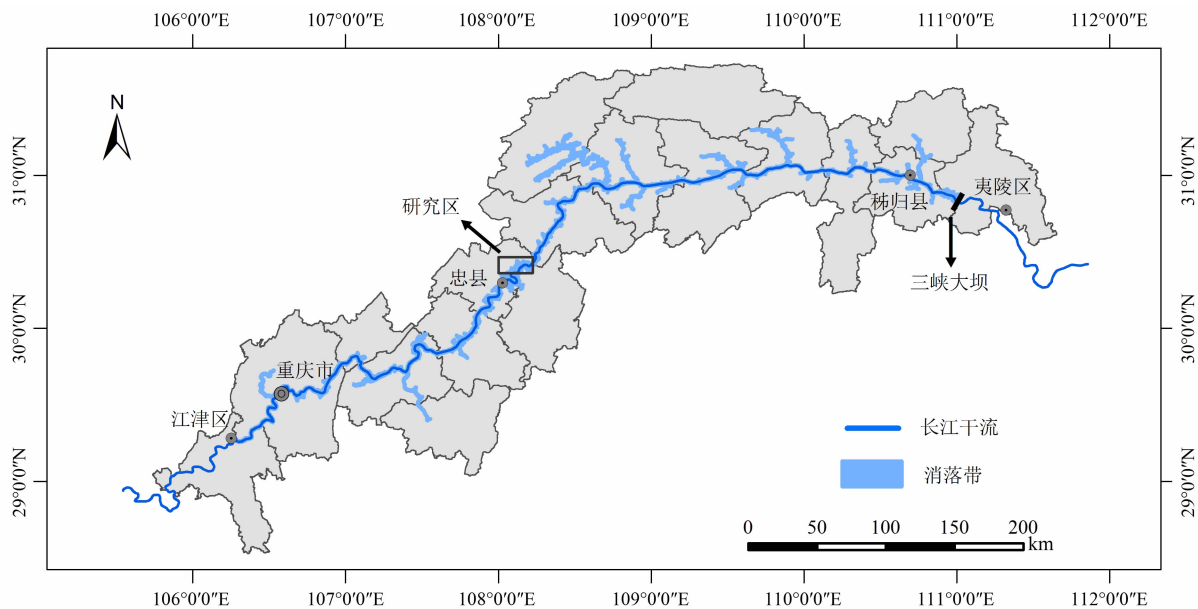
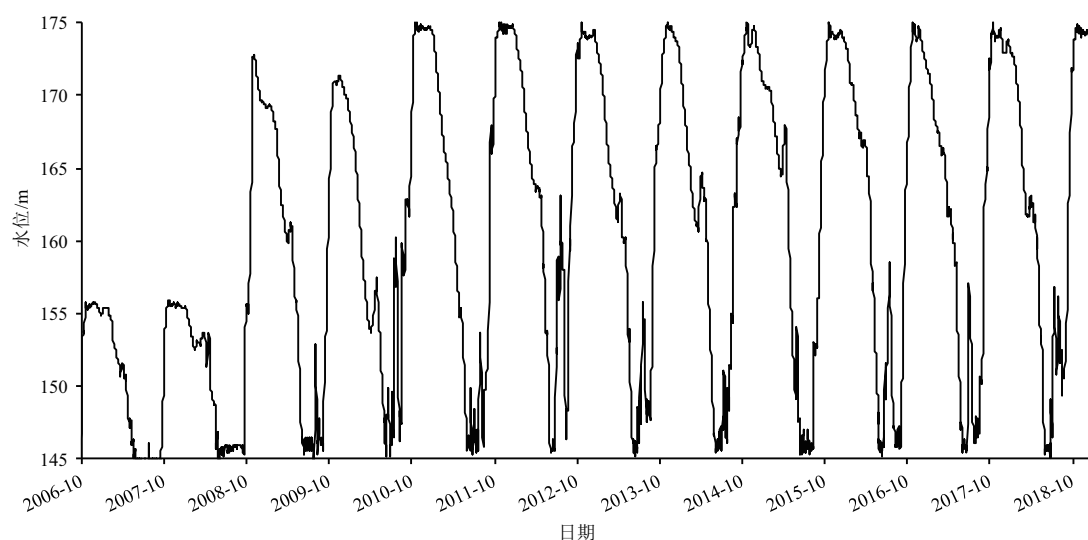


图1 三峡库区地形图及研究区位置

Fig.1 Geographical map of the Three Gorges Reservoir Area and location of the study area



资料来源:中国长江三峡集团有限公司, www.ctg.com.cn/sxjt/sqk/index.html

图2 三峡水库水位时间变化(2006—2018年)

Fig. 2 Temporal changes in water level of the Three Gorges Reservoir from 2006 to 2018

和6~8 a,年平均淹水时间分别为306、216和110 d,淹水深度分别为20~30、10~20和0~10 m。每个样带按这3个水位高程进行采样,同时采集库岸未淹水高程(CK,180 m)的土壤作为对照。

在每个水位高程选取多个采样点采集表层土壤样品并将样品混合均匀,然后将每个样品分成两份,一份样品先后用孔径为5 mm和3 mm的土壤筛进行筛分,得到孔径为3~5 mm的团聚体样品,用于同步辐射CT扫描,在扫描前将样品储存于4℃的冰箱中;另一份样品自然风干后用于测定土壤理化性质。土壤理化性质采用常规方法测定,其中土壤颗粒组成测定采用MasterSize2000型激光粒度分析仪,根据国际制划分标准进行划分,即0.02~2 mm为砂粒,0.002~0.02 mm为粉粒,<0.002 mm为粘粒;土壤容重用环刀法测定;孔隙度通过容重和密度计算得到;土壤有机碳用元素分析仪测定。

1.3 CT扫描和图像处理

从每个水位高程的3~5 mm团聚体样品中随机选取6个样品,采用上海光源X射线成像及生物学应用光束线站(BL13W1)的同步辐射显微CT进行扫描,仪器的光子能量和分辨率分别设置为25000 eV和3.25 μm,探测器和样品台之间的距离为15 cm。将团聚体固定在塑料管中,然后放置到样品台上,样品台在水平方向从0°到180°进行匀速旋转,每个样品共获取约900幅投影图像。投影

图像通过PITRE软件依次进行相位恢复、CT切片重构、图像格式转化等操作,最终每个样品获得约1200张1228×1228像素的8位tiff格式灰度图像。重建后的灰度图像利用ImageJ 1.51软件进行图像处理(包括增强对比度、中值滤波、选择感兴趣区域),然后采用全局阈值法进行二值分割,得到每个样品的二值图像,最后利用成都西图科技有限公司自主研发的三维图像重建及分析系统V1.0软件完成三维结构的重建,获得每个样品的三维图像,并利用ImageJ 1.51软件对团聚体孔隙特征进行定量分析。

1.4 孔隙结构分析

为了避免采样和运输过程中样品边界扰动对研究结果的影响,从团聚体图像的中间部分截取了400×400×400体元(1.3 mm×1.3 mm×1.3 mm)进行分析。利用ImageJ 1.51软件分别获取孔隙度、表面积、孔隙数量和孔隙节点数量等基本信息,其中孔隙数量是内部孔隙和边界孔隙数量之和,多个孔隙的连接点是孔隙节点^[7]。根据孔隙当量直径大小将孔隙分为<30 μm的贮存孔隙、30~100 μm的毛管孔隙和>100 μm的通气孔隙^[7]。孔隙形状影响着土壤的水分运移及透气性能,孔隙形状系数F根据以下公式计算得到^[21]:

$$F = A_e/A \quad (1)$$

式中, A_e 为孔隙等体积球体的表面积 (μm^2); A 为孔隙的实测表面积 (μm^2)。根据孔隙形状系数将孔隙分为瘦长型 (EP, $F \leq 0.2$)、不规则型 (IRP, $0.2 < F < 0.5$) 和规则型 (RP, $F \geq 0.5$)^[8-9]。

利用 ImageJ 1.51 软件中的插件 BoneJ 获得孔隙结构的分形维数和欧拉特征值 (简称欧拉值), 其中分形维数根据计盒子算法得到, 反映了孔隙的自相似性, 体现了孔隙的复杂性和不规则性, 分形维数值的大小在 2 和 3 之间, 其值越大则孔隙结构越复杂^[9-10]; 欧拉值体现了孔隙的连通性, 欧拉值越大则孔隙连通性越低^[9-10]。

1.5 数据分析

采用 SPSS19.0 软件对不同水位高程团聚体孔隙特征参数进行单因素方差分析 (ANOVA), 应用最小显著性差异法 (LSD) 进行多重比较, 采用 Person 法进行相关分析。图形采用 Excel 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

不同水位高程土壤基本理化性质见表 1。土壤颗粒组成中砂粒和粉粒含量较高, 粘粒含量较低, 属于砂质壤土。随着水位高程的降低, 砂粒含量由 29.18% (CK) 逐渐增加到 46.41% (LE), 粉粒和粘粒含量由 CK 的 67.17% 和 3.65% 分别降低到 LE 的 51.34% 和 2.25%, 土壤粗化。土壤容重随着水位高程的降低逐渐增加, 最大增加幅度为 23.62%, 而总孔隙度变化与容重变化相反, 由 CK 组的 54.30% 逐渐降低到 LE 组的 42.16%。有机碳随着水位高程的降低显著降低, 与 CK 组相比, HE、ME 和 LE 的有机碳含量分别降低了 26.53%、31.85% 和 66.96%。

2.2 团聚体微结构可视化

不同水位高程土壤团聚体微结构的二维和三维图像如图 3 所示。由二维图像 (灰色图像中黑色为孔隙, 二值图像中白色为孔隙) 可以看出, 未淹水高程 180 m (CK) 的孔隙数量最多, 孔隙面积最大, 且孔隙大小和形状最不均匀, 随着水位高程的降低, 孔隙数量呈减少的趋势, 孔隙面积降低, 孔隙形状由复杂的、连通的、不规则形状逐渐转变为相对均一的、孤立的规则形状, 特别是在低水位高程 (LE), 孔隙数量最少, 二维图像中出现了较多的孤立的、规则的

中、小孔隙。由孔隙结构的三维图像 (红色边框内为孔隙三维结构) 可知, 随着水位高程的降低, 孔隙密度由紧实变得越来越稀疏, 大的相互连通的孔隙减少。结合不同水位高程团聚体的二维和三维结构图像发现, 随着水位高程的降低, 团聚体微结构由复杂多孔的疏松结构转变为均一少孔的致密结构, 孔隙的体积和连通性均降低, 表明水位周期性涨落导致消落带不同水位高程团聚体孔隙大小和形状发生变化, 且这种变化随着淹水时间和淹水深度的增加而更加显著。

2.3 团聚体孔隙基本特征

由于仪器分辨率为 $3.25 \mu\text{m}$, 本文仅对大于 $3.25 \mu\text{m}$ 的孔隙进行分析。不同水位高程团聚体孔隙的基本特征见表 2。随着水位高程的降低, 团聚体孔隙度显著降低 ($P < 0.05$), 与 CK 相比, HE、ME 和 LE 的孔隙度分别降低了 21.80%、47.68% 和 59.58%, 且相互间差异显著。孔隙数量和孔隙节点数量随着水位高程的降低也显著降低, 从 CK 到 LE 团聚体的孔隙数量和孔隙节点数量分别降低了 56.64% 和 91.18%, 说明周期性水位涨落不仅降低了孔隙数量, 也减少了孔隙分支, 出现了更多的孤立孔隙。随着水位高程的降低, 团聚体的孔隙形状系数逐渐由 0.54 增大到 0.58, 表明团聚体孔隙类型随着淹水时间和淹水深度的增加趋向简单。分形维数随着水位高程的降低而显著降低, 从 CK 的 2.87 降低到 LE 的 2.52, 而欧拉值则随着水位高程的降低而显著增加, 从 CK 的 $2.73 \times 10^{-7} \mu\text{m}^{-3}$ 增加到 LE 的 $30.91 \times 10^{-7} \mu\text{m}^{-3}$, 且分形维数和欧拉值除在 CK 和 HE 之间差异不显著外, 在其他各组之间差异显著 ($P < 0.05$), 表明孔隙的复杂程度和连通性随着淹水时间和淹水深度的增加而显著降低, 孔隙结构随水位高程降低趋向简单, 这与图像目视分析的结果一致。

2.4 团聚体孔隙大小分布特征

不同水位高程土壤团聚体孔隙大小分布如图 4 所示。4 个水位高程的团聚体均以 $> 100 \mu\text{m}$ 的通气孔隙度为主, 占总孔隙度的 90% 以上, 而 $30 \sim 100 \mu\text{m}$ 的毛管孔隙度和 $< 30 \mu\text{m}$ 贮存孔隙度占的比例均较小。未淹水高程 (CK) 团聚体的通气孔隙度最大, 为 30.29%, 随着水位高程的降低, $> 100 \mu\text{m}$ 的通气孔隙度显著降低, HE、ME 和 LE 比 CK 的通气孔隙度分别降低了 23.18%、50.97% 和 61.88%, 且 4

表 1 不同水位高程土壤基本理化性质

Tab. 1 Basic physical and chemical properties of tested soils at different water levels

水位高程	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%	容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	有机碳/(g·kg ⁻¹)
LE	46.41 ± 2.06c	51.34 ± 1.90a	2.25 ± 0.21a	1.59 ± 0.11c	42.16 ± 3.77a	4.16 ± 0.28a
ME	38.43 ± 0.83b	58.22 ± 0.80b	3.35 ± 0.04bc	1.52 ± 0.10bc	44.60 ± 3.73ab	7.92 ± 0.25b
HE	35.80 ± 0.92b	61.17 ± 0.87b	3.03 ± 0.06b	1.40 ± 0.14ab	49.52 ± 4.92bc	9.90 ± 0.36c
CK	29.18 ± 0.46a	67.17 ± 0.29c	3.65 ± 0.18c	1.26 ± 0.21a	54.30 ± 8.50c	12.59 ± 0.62d

注:同一列不同小写字母表示不同水位高程土壤性质差异显著($P < 0.05$)。

表 2 不同水位高程团聚体孔隙基本特征

Tab. 2 Basic features of soil aggregate pores at different water levels

水位高程	孔隙度/%	孔隙数量	孔隙节点数量	形状系数	分形维数	欧拉值/(10 ⁻⁷ μm ⁻³)
LE	12.46 ± 1.37a	3199.46 ± 871.44a	452.00 ± 80.13a	0.58 ± 0.02b	2.52 ± 0.08a	30.91 ± 7.36c
ME	16.13 ± 1.65b	4588.96 ± 444.84b	772.25 ± 43.18a	0.56 ± 0.01b	2.71 ± 0.07b	18.58 ± 2.79b
HE	24.11 ± 1.28c	6284.50 ± 677.79c	2991.75 ± 591.98b	0.55 ± 0.01a	2.80 ± 0.03c	7.10 ± 0.83a
CK	30.83 ± 2.91d	7379.33 ± 1321.51c	5121.50 ± 802.42c	0.54 ± 0.01a	2.87 ± 0.02c	2.72 ± 0.60a

注:同一列不同小写字母表示不同水位高程孔隙特征差异显著($P < 0.05$)。

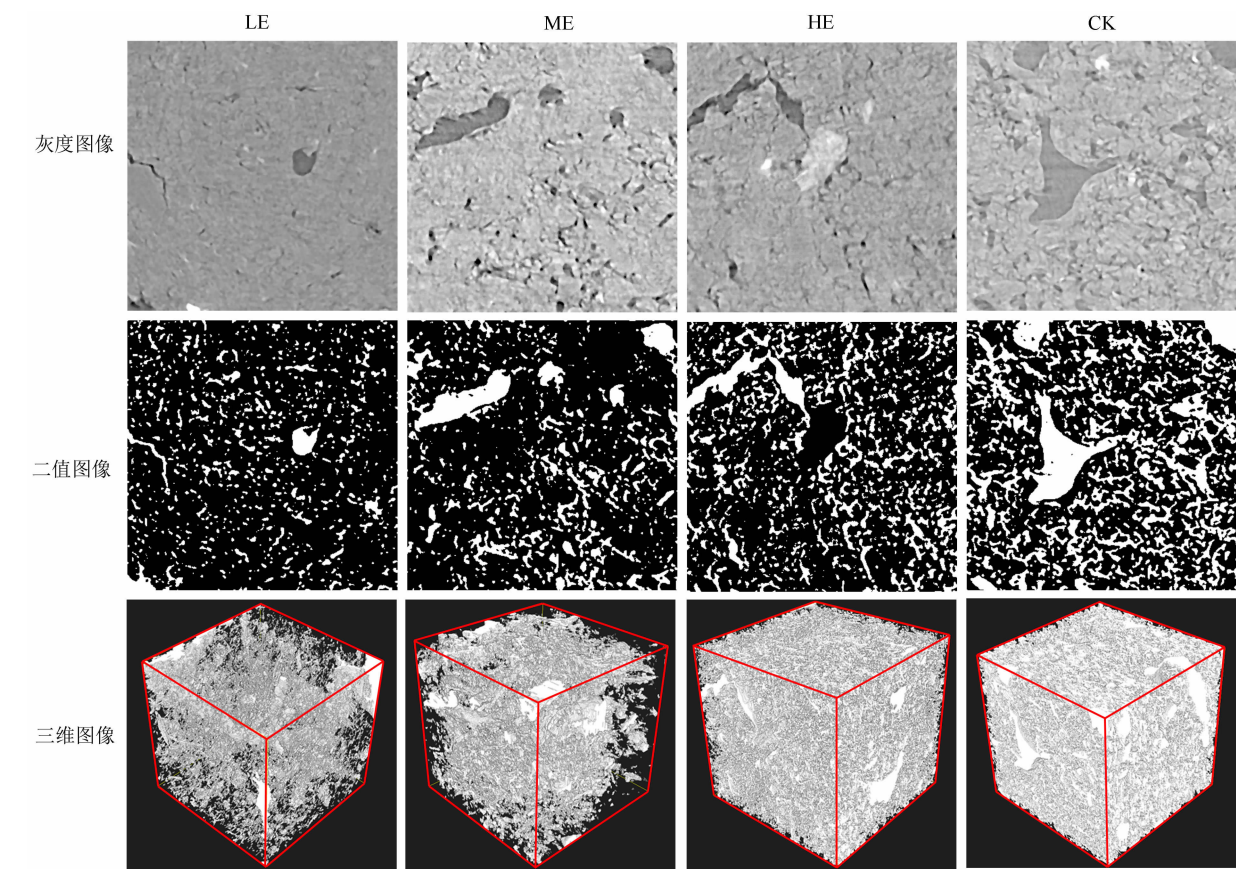
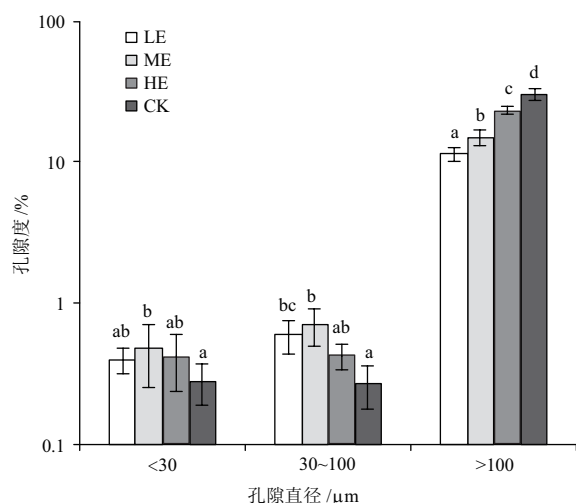


图 3 不同水位高程土壤团聚体二维和三维图像

Fig. 3 Two-dimensional and three-dimensional images of soil aggregate at different water levels



注:不同小写字母表示同一孔径不同水位高程孔隙度差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 不同水位高程团聚体孔隙大小分布

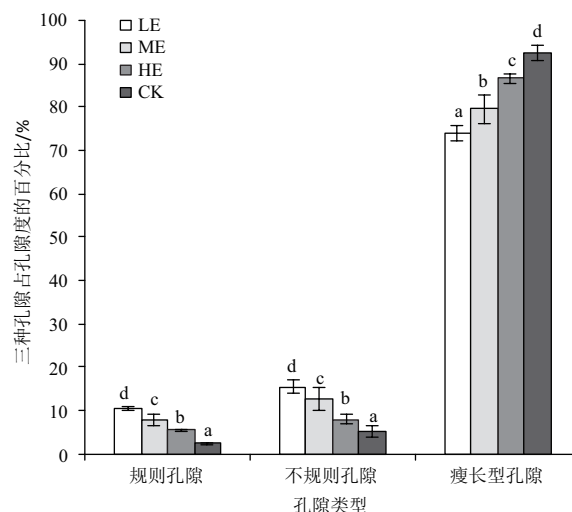
Fig.4 Pore size distribution of soil aggregate at different water levels

个水位高程间差异显著 ($P < 0.05$),表明水位周期性涨落降低了土壤的通气性和导水率。30 ~ 100 μm 的毛管孔隙度和 <30 μm 贮存孔隙度均随着水位高程的降低先增加后降低,CK 的毛管孔隙度和贮存孔隙度最低,分别为 0.27% 和 0.28%,ME 的毛管孔隙度和贮存孔隙度最大,分别为 0.70% 和 0.48%。三类孔隙度随水位高程的变化表明,水位周期性涨落使得部分大孔隙转变为中、小孔隙。

2.5 团聚体孔隙形状特征

不同水位高程土壤团聚体孔隙形状分布如图 5 所示。4 个水位高程三种孔隙占孔隙度的百分比均是瘦长型孔隙 > 不规则孔隙 > 规则孔隙,其中瘦长型孔隙占总孔隙度的 74% 以上。规则孔隙、不规则孔隙和瘦长型孔隙占孔隙度的百分比在 4 个水位高程之间的差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$)。随着水位高程的降低,规则孔隙度和不规则孔隙占孔隙度的百分比均显著增加,与 CK 的规则孔隙度占比 (2.47%) 和不规则孔隙度占比 (5.15%) 相比,HE、ME 和 LE 的规则孔隙度占比分别增加了 119.16%、213.85% 和 323.34%,HE、ME 和 LE 的不规则孔隙度占比分别增加了 55.74%、145.95% 和 200.84%。瘦长型孔隙占孔隙度的百分比随着水位高程的降低显著降低,与 CK 的瘦长型孔隙度占比 (92.38%) 相比,HE、ME 和 LE 的瘦长型孔隙度占比分别降低了 6.29%、13.85% 和 19.83%,表明周期性水位

涨落使得部分瘦长型孔隙转变为不规则孔隙和规则孔隙。



注:不同小写字母表示同一类型孔隙不同水位高程孔隙度百分比差异显著 ($P < 0.05$)。

图5 不同水位高程团聚体孔隙形状分布

Fig.5 Pore shape distribution of soil aggregate at different water levels

2.6 团聚体微结构特征与土壤理化性质相关分析

土壤团聚体微结构特征与土壤理化性质参数的相关分析如表 3 所示。团聚体的孔隙度、孔隙数量、孔隙节点数量、分形维数、通气孔隙度、瘦长孔隙占总孔隙度的百分比与砂粒含量、容重均呈极显著负相关 ($P < 0.01$),而与粉粒含量、粘粒含量、总孔隙度、有机碳呈显著或极显著正相关。团聚体的孔隙形状系数、欧拉指、规则孔隙占孔隙度的百分比、不规则孔隙占孔隙度的百分比与砂粒含量、容重极显著正相关 ($P < 0.01$),与粉粒含量、粘粒含量、总孔隙度、有机碳显著或极显著负相关。毛管孔隙度仅与有机碳显著负相关,贮存孔隙度与理化性质参数相关性均不显著 ($P > 0.05$)。由此可知,消落带周期性淹水一出露过程中土壤颗粒组成、容重和有机碳的改变会影响团聚体微结构特征,其中有机碳对团聚体微结构的影响最为显著。

3 讨论

水文节律是造成消落带土壤特性和土壤结构变化的主要驱动因子,三峡水库独特的水位调节机制,使得消落带不同高程水位涨落的幅度、频率和强度具有差异 (图 1),导致消落带不同水位高程土壤受

表 3 土壤团聚体微结构特征与土壤性质参数的相关分析

Tab. 3 Correlation analysis between soil aggregate microstructure and soil properties

团聚体微 结构特征	团聚体孔隙 特征指标	土壤理化性质参数					
		砂粒	粉粒	粘粒	容重	总孔隙度	有机碳
团聚体孔隙 基本特征	孔隙度	-0.78 **	0.79 **	0.56 *	-0.74 **	0.73 **	0.93 **
	孔隙数量	-0.73 **	0.73 **	0.60 *	-0.68 **	0.66 **	0.81 **
	孔隙节点数量	-0.75 **	0.76 **	0.51 *	-0.73 **	0.73 **	0.89 **
	形状系数	0.75 **	-0.75 **	-0.58 *	0.74 **	-0.76 **	-0.78 **
	分形维数	-0.76 **	0.75 **	0.66 **	-0.72 **	0.70 **	0.88 **
	欧拉值	0.87 **	-0.87 **	-0.68 **	0.59 *	-0.60 *	-0.88 **
团聚体孔隙 分布特征	$P_{<30}$	0.07	-0.09	0.08	0.02	-0.04	-0.15
	$P_{30 \sim 100}$	0.49	-0.48	-0.25	0.46	-0.49	-0.60 *
	$P_{>100}$	-0.78 **	0.79 **	0.55 *	-0.73 **	0.73 **	0.92 **
团聚体孔隙 形状特征	P_{RP}	0.83 **	-0.83 **	-0.66 **	0.73 **	-0.73 **	-0.95 **
	P_{IRP}	0.77 **	-0.78 **	-0.55 *	0.65 **	-0.67 **	-0.92 **
	P_{EP}	-0.80 **	0.81 **	0.60 *	-0.69 **	0.70 **	0.94 **

注:表中的数值均为相关系数;* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关; $P_{<30}$ 、 $P_{30 \sim 100}$ 和 $P_{>100}$ 分别为贮存孔隙度、毛管孔隙度和通气孔隙度; P_{RP} 、 P_{IRP} 和 P_{EP} 分别为规则孔隙、不规则孔隙和瘦长孔隙占孔隙度的百分比。

淹水浸泡、干湿交替、降雨击溅、径流冲刷和波浪冲击等的影响不同,植被生长和生物活动受到限制,进而造成不同水位高程的土壤特性及团聚体微结构的
空间分异。本文研究发现,周期性水位涨落对消落带土壤团聚体微结构影响显著,随着水位高程的降低,团聚体微结构由疏松多孔变为紧实少孔,孔隙度、孔隙数量和孔隙节点数量均显著降低,这与 Cui 等^[18]和康义等^[22]的研究结果一致,孔隙特征的变化可能与低水位区长久的淹水持续时间以及细小颗粒在孔隙系统中的沉积有关^[18]。Zhang 等^[17]研究表明周期性的水位涨落使得消落带 160 m 的土壤呈现复杂多孔的疏松结构,孔隙度和孔隙数量均增加,与本文研究结果相反,这种差异可能与土壤尺度有关。Zhang 等^[17]研究的是 Φ 5 cm \times 5 cm 的原状土柱,尺度较大,土壤孔隙除了包括团聚体内部孔隙外,还包含大量的团聚体间孔隙,在极端干湿交替下,土壤崩解或原有孔隙扩展,团聚体间形成大孔隙甚至是裂隙,增加了团聚体间的孔隙;而本文研究的是 3 ~ 5 mm 团聚体内部的孔隙,在微观尺度上土壤崩解产生的细小颗粒可能沉积在孔隙系统中,堵塞原有孔隙^[18],造成团聚体内部孔隙的降低。

三峡水库消落带周期性水位涨落对团聚体孔隙

的形态特征和大小分布具有显著影响。随着水位高程的降低,分形维数显著降低,欧拉值则显著增加,分形维数和欧拉值的变化与孔隙度及形状系数变化有关^[9]。本文研究发现消落带周期性的淹水一出露交替使得团聚体中部分 $>100 \mu\text{m}$ 的大孔隙转变为 $<100 \mu\text{m}$ 的中、小孔隙,部分瘦长型孔隙转变为不规则和规则孔隙,这与 Ma 等^[11]的研究结果正好相反,这种差异主要与土壤本身性质有关。Ma 等^[11]研究的土壤为粘粒含量较高的黏土,干湿交替过程中土壤会产生强烈的干燥收缩和微弱的湿润膨胀作用,团聚体中原有孔隙扩展或新的孔隙甚至是裂隙形成,而瘦长型孔隙是大孔隙的主要表现形式,因此瘦长型孔隙度显著增加。本研究中土壤粘粒含量极低(表 1),且矿物组成主要以原生矿物为主,次生矿物含量低且以膨胀性较小的高岭石、绿泥石等为主^[18],造成消落带淹水一出露过程中土壤团聚体的非均匀膨胀作用极弱,主要以淹水过程中土壤孔隙中空气爆破产生的消散作用为主^[16],消散作用产生的细小颗粒堵塞原有孔隙,最终造成团聚体大孔隙和瘦长孔隙度的下降。

三峡水库消落带团聚体孔隙特征随水位高程的变化主要与不同水位高程的淹水时间和淹水深度的

变化有关。一方面,随着水位高程的降低,土壤淹水浸泡的时间和淹水的深度均增加,使得土壤受到的水柱压力逐渐增大,而水柱压力对土壤骨架具有压实和固结作用,土壤孔隙被压缩使得土壤颗粒间的联结得到加强^[23],结构变得紧实少孔,压力越大,这种作用越显著。另一方面,随着水位高程的降低,消落带的植被群落、生物活动和土壤特性发生较大变化,从而影响团聚体的孔隙特征。土壤团聚体孔隙特征与土壤颗粒组成、容重、有机碳显著相关(表3),随着水位高程的降低,植被多样性和覆盖度降低幅度增大,土壤动物和微生物的活动受到限制,造成消落带内土壤有机质含量和粘粒含量随着水位高程的降低而降低(表1),使得颗粒的胶结作用和团聚程度降低,且随着水位高程的降低,土壤淹水浸泡的时间增加,土壤软化、泥化和崩解程度加剧,崩解的细小颗粒在水流作用下发生迁移,一些随水流进入水库,还有一些可能会沉积在原有的孔隙系统中,堵塞孔隙使团聚体孔隙度降低。另外,低水位高程受波浪影响最大,在波浪不断的击打下土壤变得紧实,土壤孔隙降低更为显著。

消落带土壤团聚体微结构的变化影响着土壤的渗透性、稳定性、抗蚀性、抗剪强度和抗冲性等物理力学性质。团聚体孔隙大小、数量、分布及形态的变化,直接影响着水分在土壤中迁移和存储,决定了土壤的持水性和渗透性;团聚体孔隙特征的变化反映了团聚体的重新排列组合,决定了孔隙中的空气压力大小和水分进入孔隙的速率,影响着团聚体崩解、分散,改变了团聚体稳定性,土壤抗蚀性随之改变^[11];团聚体孔隙特征变化改变了土壤容重,引起土壤粘聚力和内摩擦角的变化,在水位的升降过程中,孔隙水压力和有效应力发生变化,加上水分的润滑和软化作用,土壤抗剪强度发生变化^[19,24];孔隙或裂隙在团聚体内部的不均匀分布造成土壤分离速率的不同,改变土壤抗冲性^[25]。团聚体孔隙特征通过影响土壤的物理力学性质,最终影响土壤侵蚀和岸坡稳定性。目前,针对三峡水库消落带土壤孔隙的研究主要是采用传统的环刀法^[22]和水分特征曲线法^[18]对原状土的孔隙度、孔隙数量和分布随淹水周期或水位高程的变化进行分析,无法获得孔隙的形态和空间分布。与传统方法相比,本文采取同步辐射显微CT研究团聚体孔隙特征随水位高程的变

化,可以对团聚体孔隙的三维结构进行重建,在分析孔隙大小、数量、分布的基础上,获得孔隙形状、孔隙网络结构的复杂性和连通性等特征,更接近土壤孔隙的真实状况。今后应考虑将本研究与土壤的渗透性、稳定性、抗蚀性、抗剪强度和抗冲性等研究相结合,为三峡水库消落带土壤抗蚀能力及岸坡稳定性评价提供依据。

4 结论

本文利用同步辐射显微CT和数字图像处理技术研究了三峡水库消落带不同水位高程团聚体微结构特征,得出如下主要结论:

(1)淹水时间和淹水深度的增加显著影响团聚体微结构。随着水位高程的降低,团聚体微结构由疏松多孔变得致密少孔,相互连通的大孔隙显著减少,团聚体中出现较多孤立的中、小孔隙。

(2)团聚体孔隙度随水位高程的降低而显著降低,与180 m相比,165~175 m、155~165 m和145~155 m的孔隙度依次降低了21.80%、47.68%和59.58%;孔隙数量和孔隙节点数量随水位高程的降低显著减少,145~155 m的降幅最大,分别为56.64%和91.18%;孔隙分形维数随水位高程降低而降低,欧拉值则随水位高程的降低而增加,表明淹水不仅降低了团聚体孔隙度和孔隙数量,而且造成孔隙分支的减少、孔隙复杂程度和连通度的降低。

(3)团聚体孔隙度以 $>100\ \mu\text{m}$ 的通气孔隙度为主,占总孔隙度的90%以上。随着水位高程的降低, $<30\ \mu\text{m}$ 的贮存孔隙度和 $30\sim100\ \mu\text{m}$ 的毛管孔隙度先增加后降低,在155~165 m达到最大,而 $>100\ \mu\text{m}$ 的通气孔隙则显著降低,165~175 m、155~165 m和145~155 m的通气孔隙度比180 m分别降低了23.18%、50.97%和61.88%,表明淹水时间和淹水深度的增加使得部分通气孔隙转变为贮存孔隙和毛管孔隙。

(4)团聚体孔隙形状以瘦长型孔隙为主,占总孔隙度的74%以上。随着水位高程的降低,规则孔隙和不规则孔隙占孔隙度的百分比显著增加,瘦长孔隙占孔隙度的百分比显著降低,表明淹水时间和淹水深度的增加使得部分瘦长型孔隙转变为规则孔隙和不规则孔隙。

参考文献 (References)

- [1] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, **9**(1): 81–85. [LU Jinwei, LI Zhanbin. Advance in soil aggregate study [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, **9**(1): 81–85]
- [2] 骆东奇, 侯春霞, 魏朝富, 等. 旱地紫色土团聚体特征的指标比较[J]. 山地学报, 2003, **21**(3): 348–353. [LUO Dongqi, HOU Chunxia, WEI Chaofu, et al. Study on the indices to the features of purple soil aggregates [J]. Mountain Research, 2003, **21**(3): 348–353]
- [3] 程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构量化研究进展[J]. 土壤通报, 2012, **43**(4): 988–994. [CHENG Ya'nan, LIU Jianli, ZHANG Jiabao. Advances in the study on quantification of soil pore structure [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, **43**(4): 988–994]
- [4] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(1): 340–347. [QI Yingchun, WANG Yiquan, LIU Jun, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, **27**(1): 340–347]
- [5] 贺秀斌, 冯桓, 冯兆东. 土壤显微结构的 X 光—同步加速器计算机三维图像透视技术[J]. 土壤学报, 2005, **42**(2): 328–330. [HE Xiubin, FENG Huan, FENG Zhaodong. 3D imaging of soil microstructure using synchrotron X-ray computed microtomography [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(2): 328–330]
- [6] CNUDDÉ V, BOONE M N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications [J]. Earth-Science Reviews, 2013, **123**: 1–17.
- [7] 姜宇, 范昊明, 侯云晴, 等. 基于同步辐射显微 CT 研究冻融循环对黑土团聚体结构特征的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(11): 4080–4087. [JIANG Yu, FAN Haoming, HOU Yunqing, et al. Characterization of aggregate microstructure of black soil with different number of freeze-thaw cycles by synchrotron-based micro-computed tomography [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(11): 4080–4087]
- [8] ZHOU Hu, PENG Xinhua, PETH S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography [J]. Soil and Tillage Research, 2012, **124**: 17–23.
- [9] 赵冬, 许明祥, 刘国彬, 等. 用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(9): 123–129. [ZHAO Dong, XU Mingxiang, LIU Guobin, et al. Characterization of soil aggregate microstructure under different revegetation types using micro-computed tomography [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(9): 123–129]
- [10] DAL FERRO N, CHARRIER P, MORARI F. Dual-scale micro-CT assessment of soil structure in a long-term fertilization experiment [J]. Geoderma, 2013, **204–205**: 84–93.
- [11] MA Renming, CAI Chongfa, LI Zhaoxia, et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography [J]. Soil and Tillage Research, 2015, **149**: 1–11.
- [12] 郑海金, 杨洁, 谢颂华. 我国水库消落带研究概况[J]. 中国水土保持, 2010, **339**(6): 26–29. [ZHENG Haijin, YANG Jie, XIE Songhua. Summary of study on fluctuation belt of reservoir area in China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2010, **339**(6): 26–29]
- [13] 王正, 肖丽微, 谭秋霞, 等. 三峡水库消落带优势草本植物对土壤氮磷的吸收富集特征[J]. 山地学报, 2019, **37**(2): 151–160. [WANG Zheng, XIAO Liwei, TAN Qiuxia, et al. Nitrogen and Phosphorus absorption from soil by the dominant herbaceous species in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Mountain Research, 2019, **37**(2): 151–160]
- [14] 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 Jianjun, CHEN Zhijian, CHEN Guojie, 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 county, Chongqing city [J]. Mountain Research, 2002, **20**(6): 712–717]
- [15] 徐泉斌, 傅瓦利, 孙璐, 等. 三峡库区消落带土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持研究, 2009, **16**(5): 13–18. [XU Quanbin, FU Wali, SUN Lu, et al. Study on soil anti-erodibility for the water level-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, **16**(5): 13–18]
- [16] 陆铸畴, 包忻怡, LIU Xiao, 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. [LU Zhuchou, BAO Xinyi, LIU Xiao, et al. Stability of soil aggregates in riparian zone of the Three Gorges Reservoir studied using the Le Bissonnais method [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, **37**(5): 115–120]
- [17] ZHANG Shujuan, TANG Qiang, BAO Yuhai, et al. Effects of seasonal water-level fluctuation on soil pore structure in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Journal of Mountain Science, 2018, **15**(10): 107–121.
- [18] CUI Junfang, TANG Xiangyu, ZHANG Wei, et al. The effects of timing of inundation on soil physical quality in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir region, China [J]. Vadose Zone Journal, 2018, **17**: 1–12.
- [19] 吕发友, 唐强, 张淑娟, 等. 三峡水库消落带紫色土物理性质对反复淹水作用的响应[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(1): 276–281. [LYU Fayou, TANG Qiang, ZHANG Shujuan, et al. Response of purple soil physical properties to repeated water flooding in water-level fluctuation zone in the Three Gorges

- Reservoir [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(1): 276–281]
- [20] HE Xiubin, BAO Yuhai, NAN Hongwei, et al. Tillage pedogenesis of purple soils in Southwestern China [J]. Journal of Mountain Science, 2009, **6**(2): 205–210.
- [21] WADELL H. Volume, shape, and roundness of rock particles [J]. Journal of Geology, 1932, **40**: 443–451.
- [22] 康义, 郭泉水, 程瑞梅, 等. 三峡库区消落带土壤物理性质变化 [J]. 林业科学, 2010, **46**(6): 1–5. [KANG Yi, GUO Quanshui, CHENG Ruimei, et al. Changes of the soil physical properties in hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, **46**(6): 1–5]
- [23] 吕发友, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带淹水—落干交替下紫色土力学特性变化模拟 [J]. 水土保持学报, 2017, **31**(3): 79–84. [LÜ Fayou, BAO Yuhai, HE Xiubin, et al. Simulation of the changes in purple soil mechanical properties in response to alternate submergence and exposure in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(3): 79–84]
- [24] 邓华锋, 李建林. 库水位变化对库岸边坡变形稳定的影响机理研究 [J]. 水利学报, 2014, **45**(S2): 45–51. [DENG Huafeng, LI Jianlin. Research on the influence mechanism of water level fluctuation on the bank landslide deformation and stability [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(S2): 45–51]
- [25] MA Renming, CAI Chongfa, WANG Jinguang, et al. Partial least squares regression for linking aggregate pore characteristics to the detachment of undisturbed soil by simulating concentrated flow in ultisols (subtropical china) [J]. Journal of Hydrology, 2015, **524**: 44–52.

Change Features of Soil Aggregate Microstructure in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir, China

ZHANG Shujuan^{1, 2}, HE Xiubin^{1*}, BAO Yuhai¹, TANG Qiang¹

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment,

Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The 30-m water-level fluctuation had led to complicated changes in terrain, vegetation and soil, especially soil aggregate microstructure in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir. In order to clarify the influence of periodic water-level fluctuation on soil aggregate microstructure in the Three Gorges Reservoir, the topsoil samples were collected from three different water levels of the riparian zone (145 ~ 155 m, 155 ~ 165 m, 165 ~ 175 m) and from the bank uplands (180 m). Soil at 180 m was used as a reference group since it was not subjected to inundation. In this study, synchrotron-based X-ray micro-computed tomography and digital image analysis techniques were used to analyze the change features of soil aggregate microstructure. The results showed that: (1) Soil aggregate porosity decreased significantly with the decrease of water levels. Compared with the porosity of 180 m, the porosities of 165 ~ 175 m, 155 ~ 165 m and 145 ~ 155 m decreased by 21.80%, 47.68% and 59.58%, respectively. Pore number and pore node number decreased significantly with the decrease of water levels, and the maximum reductions were 56.64% and 91.18%, respectively. Pore fractal dimension decreased with the decrease of water levels, while Euler number increased with the decrease of water levels. (2) The porosity was mainly comprised of non-capillary porosity that diameter larger than 100 μm , accounting for more than 90% of the total porosity. With the decrease of water levels, both the storage porosity of <30 μm and the capillary porosity of 30 ~ 100 μm increased firstly and then decreased, while the non-capillary porosity of >100 μm was significantly reduced. (3) The pores were dominated by the elongated pores. With the decrease of water levels, the percentages of regular and irregular porosities increased significantly, while the percentage of elongated porosity decreased. It

can thus be deduced that periodic water-level fluctuation of the Three Gorges Reservoir had significant effects on aggregate pore number, pore size distribution, and pore morphology, which had a significant correlation with soil particle composition, bulk density and soil organic carbon content. The changes in soil aggregate pore features with water levels could be attributed to the impacts of inundated duration, inundated depth and wet-dry alternations. The research may have profound implications for studying soil erosion mechanism and bank stability in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir.

Key words: aggregate; microstructure; synchrotron-based micro-computed tomography; water-level fluctuation zone; Three Gorges Reservoir