

doi:10.11707/j.1001-7488.20190403

三峡库区消落带土壤化学性质年际变化特征 *

郭 燕^{1,2} 程瑞梅^{1,2} 肖文发^{1,2} 沈雅飞^{1,2} 杨 邵^{1,2}
王 娜^{1,2} 刘泽彬^{1,2} 王晓荣^{1,3}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室 北京 100091;
2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心 南京 210037; 3. 湖北林业科学研究院 武汉 430075)

摘要: 【目的】分析三峡库区消落带经历长期水库水位变化后的土壤化学性质,为揭示消落带水文环境变化提供科学依据。【方法】在秭归段消落带回水区选择典型次生灌丛固定监测样地,根据库区水位运行计划,于2008、2009、2012、2014和2015年(分别经历0、1、4、6和7次水位涨落)对不同海拔(145~155、155~165、165~175、175~185 m)样地的不同土层(0~10和10~20 cm)土壤的pH值和有机质及碱解氮、速效磷和速效钾含量进行测定。【结果】经历7次水位涨落后,所有海拔的pH值均明显增加,其中海拔145~155 m土壤由酸性(pH6.1)变为碱性(pH8.2),而其他海拔土壤逐渐由酸性趋于中性;水淹海拔区土壤有机质含量高于非水淹对照海拔(175~185 m),且随水淹时间增加,0~10 cm土层有机质含量较2008年呈逐年下降趋势,而10~20 cm土层则先增加后降低;随水位涨落周期的增加,土壤碱解氮含量呈波动性下降趋势,且0~10 cm土层土壤对水淹影响更为敏感,0~10 cm土层碱解氮以2009年和2015年下降最为显著($P<0.05$),和2008年相比各海拔降幅分别达37.2%~54.7%和50.6%~65.7%;0~10 cm土层速效钾含量在2009年降幅最大,达17.1%~50.8%;速效磷含量则呈逐年下降趋势,且在速效养分中的流失量最大,在经历4、6和7次水位涨落后,速效磷含量较2008年分别下降78.0%、94.8%、91.6%(0~10 cm)和89.5%、93.6%、92.5%(10~20 cm)。【结论】随三峡水库运行周期的不断延长,消落带土壤pH值升高、有机质含量下降,消落带土壤养分匮乏现象将突显,对于消落带经历长期水位涨落后的土壤化学性质变化仍需长期监督。

关键词: 消落带; 次生灌丛; 水位涨落; 土壤 pH 值; 土壤有机质; 土壤速效养分; 年际变化

中图分类号: S714.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2019)04-0022-09

Inter-Annual Variation of Soil Chemical Properties in the Water-Level-Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir

Guo Yan^{1,2} Cheng Ruimei^{1,2} Xiao Wenfa^{1,2} Shen Yafei^{1,2}
Yang Shao^{1,2} Wang Na^{1,2} Liu Zebin^{1,2} Wang Xiaorong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry Beijing 100091; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University Nanjing 210037; 3. Hubei Forestry Academy Wuhan 430075)

Abstract: 【Objective】Chemical properties of soils at different altitudes and layers after long-term reservoir water level changes were analyzed to understand the degree of variation of soil environment after years of drastic changes in dry-wet alternation in the fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir.【Method】Sample plots were set up in a secondary shrub forest within the typical hydro-fluctuation belt in the Three Gorges Reservoir. According to the water level operation plan of the reservoir area, the pH-value, organic matter, and contents of available N, available P and available K in the soil at different altitudes (145~155, 155~165, 165~175, and 175~185 m) in different soil layers (0~10 and 10~20 cm) were measured in 2008, 2009, 2012, 2014, and 2015 (that is, through 0, 1, 4, 6, and 7 fluctuations of water level, respectively).【Results】Results showed that soil pH-values at all altitudes increased obviously, the pH value at 145~155 m changed from acid (pH6.1) to alkaline (pH8.2), and the pH-values at other altitudes gradually tended to be neutral after 7 fluctuations of water level. The extent of pH variation at different altitudes was: 145~155 m > 155~165 m > 165~175 m > 175~185 m. Organic matter content decreased with increasing water level fluctuations. The content of available N in the 0~10 cm soil layer decreased significantly after water level fluctuations, especially after 7 fluctuations. The content of available P and available K also decreased with increasing water level fluctuations.【Conclusion】With the extension of the operating cycle of the Three Gorges Reservoir, the soil pH value in the water-level-fluctuation zone will increase, and the soil nutrient deficiency phenomenon will become more prominent. It is still necessary to monitor the soil chemical properties of the water-level-fluctuation zone over a long period of time.

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2019-03-05。

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2017ZA002); ‘十三五’国家重点研发计划(2017YFC050530402)。

* 程瑞梅为通讯作者。

175 m > 175–185 m. The content of soil organic matter in the flooded area was higher than that of the non-flooded area at 175–185 m. With the increase of flood duration, the content of organic matter in the 0–10 cm soil layer decreased year by year compared with that in 2008, but in the 10–20 cm soil layer it increased first and followed by a decrease. With the increase of the number cycles of water level fluctuation, the contents of soil alkali hydrolysable nitrogen and available potassium showed a downward trend of fluctuation, and the contents in the 0–10 cm soil layer were more sensitive to flooding compared with those in 10–20 cm layer. The alkali hydrolyzed nitrogen in 0–10 cm soil layer decreased most significantly in 2009 and 2015, and compared with 2008, the decrease at all altitudes was by 37.2%–54.7% and 50.6%–65.7%, respectively. Moreover, the decrease of available potassium in 0–10 cm soil layer was the largest in 2009, up to 17.1%–50.8%. The content of available P decreased year by year, and the loss of available P was the biggest among all the available nutrients. After 1, 4, 6 and 7 fluctuations of water level, the content of available phosphorus in 0–10 cm layer significantly decreased by 21.8%, 45.4%, 82.2%, and 90.2%, and the content of available phosphorus in 10–20 cm layer significantly ($P < 0.01$) decreased by 44.3%, 61.5%, 83.5%, and 92%, respectively. **【Conclusion】** With continual extension of the operation period of the Three Gorges reservoir, the soil properties of the fluctuating zone change gradually, reflected by the increased soil pH-values, the decreased content of organic matter, and the depleted available nutrients. To a certain extent, this provides a new scientific basis for predicting succession process of ecological environment quality and the changes of soil properties in the reservoir area under long-term flooding conditions.

Key words: water-level-fluctuation zone; secondary shrub; annual fluctuation of water level; soil pH; soil organic matter; soil available nutrients; inter-annual variability

消落带是库区周边因水位周期性涨落而周期性淹没或出露于水面的水陆系统交互地带(苏维词等, 2003)。在秭归段特殊峡谷, 受三峡大坝反季节运行模式影响, 产生了不同于其他消落带的特殊环境因子、生态过程和植被群落梯度, 对外界扰动非常敏感, 容易发生水土流失、生境退化、生态系统多样性减少等生态系统退化状况, 其土壤理化性质也会受消落带冬季淹水、夏季干旱的特殊干湿交替生境影响而改变(张希彪等, 2006)。现已成为三峡库区生态系统中物质转化、能量流动、信息传输与转换等最活跃且最不稳定的生态脆弱带(朱妮妮等, 2015)。

土壤是植物生存的物质基础, 同时也是消落带生态系统内物质和能量交换等生态过程进行的重要场所(常超等, 2009), 具有过滤、缓冲、调节及储存土壤营养等多种功能。土壤-水体复合系统之间的物质交换过程受不同类型因素影响而具有时空变异性(Ye *et al.*, 2012; 2014; 杨予静等, 2015)。任何有关海拔、植被、水分、生境类型、人为干扰等环境因素的改变, 都可通过土层内化学元素的改变而得到反映(张希彪等, 2006)。为顺利开展三峡库区的植被恢复与重建, 探索库区土壤化学性质及变化规律十分必要。在三峡库区建设初期, 就有许多学者通过模拟试验探究水库运行后因生态环境变化而引起的土壤理化性质特征及变化规律, 模拟环境与真实变化存在一定差异, 但还是在一定程度上为未来消

落带植被恢复和重建提供了可供参考的资料(张金洋等, 2004; 王改改等, 2008; 袁辉等, 2008; 傅杨武等, 2010; 刘泽斌, 2014)。随着水库的运行以及周期性淹水-落干-淹水的持续影响, 消落带土壤的化学性质在很长一段周期内处于动态变化中, 因此, 很多学者开始将研究重点转向通过设置固定监测样地, 探究消落带不同区段土壤 pH 值、养分特征差异程度(沈雅飞等, 2016; 贾国梅等, 2016; 王娅微等, 2016), 或研究不同植被类型、不同生活型植物及植被重建后的土壤养分状况(王晓峰等, 2015; 任庆水等, 2016)。目前研究多集中于模拟试验、群落学观察、种植试验和实地试验等短期监测和研究(一般 2~3 年), 缺乏长期水淹后不同海拔不同土层间土壤化学性质随水位涨落年限增加的年际变化规律研究。

本研究基于三峡库区水位的时间和空间动态特征, 选取秭归段典型区域的峡谷地貌消落带样地, 通过长期定位研究监测, 分析三峡库区消落带经历长期水库水位变化后不同海拔不同土层土壤的土壤化学性质特征, 以期为了解土壤环境承受多年干湿交替剧烈环境变化后的变化规律提供理论依据。

1 研究区概况

本研究区域位于湖北省宜昌市秭归县茅坪镇, 长江西陵峡南岸, 三峡工程坝上库首($10^{\circ}00'04''$ — $110^{\circ}18'41''E$, $30^{\circ}38'14''$ — $31^{\circ}11'31''N$)。地势西南

高东北低,分散有河谷阶地、槽冲小坝和梯田坡地,属长江三峡山地地貌。气候属亚热带大陆性季风气候,境内山峦起伏,气候垂直变化明显,且四季分明,雨热同季,年均气温17℃,年均降水量1100 mm。三峡工程竣工后,三峡水库受“冬蓄夏排”反季节性水库水位周期性涨落的胁迫,库区周边被淹土地周期性出露于水面,逐渐形成30 m落差的三峡库区消落带,其典型植被由马尾松(*Pinus massoniana*)转变为现有次生灌丛和弃耕地2种植被类型,土壤类型为花岗岩母质风化而成的黄壤和黄棕壤两种,土层浅薄,厚约40 cm,受库区水位涨落及降水影响,水土流失严重。

本研究所在消落带上缘为次生灌丛植被,灌丛植物群落共有21科33属43种,以蔷薇科(Rosaceae)、樟科(Lauraceae)和忍冬科(Caprifoliaceae)为优势科,分别占灌木总科数的32.4%、13.7%和8.6%,以木姜子(*Litsea pungens*)、高粱泡(*Rubus lambertianus*)、白叶莓(*Rubus innominatus*)和香椿(*Toona sinensis*)为优势种。自2008年,经7次水位涨落,消落带内植被逐渐变为以一年生和多年生草本植物为主,现草本植被群落共有28科45属48种,以菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、莎草科(Cyperaceae)、茜草科(Rubiaceae)和金星蕨科(Thelypteridaceae)为优势科,分别占草本总科数的20.6%、15.4%、11.9%、10.8%和8.7%,以三脉紫菀(*Aster ageratoides*)、鸡矢藤(*Paederia scandens*)、青绿薹草(*Carex breviculmis*)和葛(*Pueraria lobata*)为优势种。

2 研究方法

2.1 样地设置

2008年8月在研究区域内设置典型消落带回水区内次生灌丛样地3块,样地面积为40 m×15 m,样地海拔为145~185 m。样地在未进行人为清库前均为以马尾松为主的林地,平均坡度为30°,郁闭度0.5,林龄20年左右。

根据水库运行计划,三峡水库在夏季雨水季节以低水位运行,在冬季以高水位运行,最高蓄水水位是175 m。由于不同海拔受水淹情况不同,故将样地在海拔上分为4个梯度,分别为145~155,155~165,165~175和175~185 m,每个海拔梯度均埋设水泥桩做标记。为方便研究,将2008年设置为水淹前期(未经历水位涨落),将2009年设置为水淹初期(经历了1次水位涨落),将2012、2014和2015年设置为水淹中期(分别经历了4、6和7次水位涨

落)。按水库的运行规律,海拔175~185 m在所选年限内均未被水淹,故将其作为对照海拔;另外,2008年8月为水库运行前期,土壤并未经历水位涨落,故将该时期土壤化学性质为背景值。

2.2 土壤样品采集与测定

于2008、2009、2012、2014和2015年每年8月,在0~10和10~20 cm土层,对样地内不同海拔梯度沿对角线用土钻分别取土9次,将同一海拔梯度的同层土壤混合,装袋标记后带回实验室处理进行化学分析。

将采集的土壤均匀平铺于干净的牛皮纸上,于阴凉通风处自然风干,去除石块、根系等杂物,研磨后全部过2 mm筛,混匀后分装2份,1份用于测定pH值和土壤速效养分,1份再次研磨后过100目筛,进行有机质及土壤养分全量测定(国家林业局,2000)。

土壤pH值采用pH酸度计法测定(常超等,2011);有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定(中国科学院南京土壤研究所,1978);速效氮含量采用碱解扩散法测定(章程等,2009);速效磷和速效钾含量均采用等离子发射光谱法测定(Adejuwon *et al.*, 1988)。

2.3 数据处理

用Excel 2013进行数据处理分析;应用统计分析软件SPSS 17.0(SPSS, Chicago, IL, USA)对各处理试验数据进行均值、标准差和差异显著性分析。

3 结果与分析

3.1 各海拔不同土层pH值7年间变化特征

由表1可以看出,水淹前期(2008年),145~155和155~165 m海拔0~10 cm土层的pH值均显著($P < 0.05$)高于对照海拔(175~185 m),165~175 m海拔pH值与对照海拔相比没有明显差异;而在10~20 cm土层,各海拔之间pH值并未发生显著变化。随着水淹时间增加,对照海拔0~10和10~20 cm土层pH值在经历1和4次水位涨落并未发生明显变化;而在7次水位涨落(2015年)显著增加,增加幅度分别达35.0%和19.4%。145~155,155~165和165~175 m海拔0~10和10~20 cm土层pH值在经历7次水位涨落同样显著增加,其中0~10 cm土层pH值较2008年增加35.4%,37.6%和30.3%,10~20 cm土层pH值较2008年增加45.7%,27.0%和28.8%,且各年限中0~10 cm土层145~155 m海拔pH值显著高于其他海拔高度。

整体来讲,水淹前期(2008年)各海拔梯度0~10和10~20 cm土层pH值大多低于6,为酸性土,且在经历1、4、6和7次水位涨落后,0~10和10~20 cm土层pH值升幅均表现为海拔145~155 m高于其他海拔梯度;对同一土层,随水淹年限增加,各海拔土壤pH值变化剧烈程度表现为海拔145~155 m>155~165 m>165~175 m>175~185 m;但不同海拔pH值随

水淹年限增加的变化规律不同,145~155 m海拔处土壤pH值升高,已达碱性,而海拔155~165和165~175 m及对照海拔175~185 m处,0~10和10~20 cm土层土壤pH值则逐渐趋于中性。

双因素分析可知:消落带不同土层不同海拔土壤pH值变化同时受年限、海拔梯度及其交互作用的影响($P<0.01$)。

表1 各海拔不同土层土壤pH值变化特征^①

Tab.1 Characteristics of soil pH variation in different soil layers at different altitudes

土层 Soil layer/cm	海拔 Altitude/m	年份 Year				
		2008	2009	2012	2014	2015
0~10	145~155	6.05±0.055Ba	5.51±0.135Ba	7.96±0.095Aa	7.98±0.285Aa	8.19±0.005Aa
	155~165	5.28±0.055Cb	5.12±0.165Cbc	6.63±0.265Bb	7.07±0.055Ab	7.26±0.1Ab
	165~175	5.04±0.005Bc	5.27±0.035Bb	6.33±0.075Ab	6.50±0.275Ac	6.56±0.09Ac
	175~185	5.00±0.1Bc	4.95±0.08Bc	5.04±0.285Bc	5.09±0.15Bd	6.75±0.05Ac
10~20	145~155	5.66±0.505Ba	5.51±0.37Ba	7.78±0.055Aa	7.83±0.265Aa	8.24±0.06Aa
	155~165	5.23±0.02Ba	5.02±0.09Ba	6.24±0.355Ab	6.53±0.025Ab	6.64±0.12Ab
	165~175	4.92±0.175Ba	5.16±0.09Ba	6.1±0.02Ab	6.28±0.325Ab	6.33±0.12Ab
	175~185	5.32±0.335Ba	5.14±0.295Ba	5.13±0.22Bc	5.61±0.57Ac	6.35±0.05Ab

①不同大写字母表示同一海拔不同年份间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一年份不同海拔间差异显著($P<0.05$)。下同。Different capital letters mean significant differences between different years in the same elevations ($P<0.05$); different small letters mean significant difference between different elevations in the same year ($P<0.05$). The same below.

3.2 各海拔不同土层有机质含量7年间变化特征

由表2可以看出,水淹前期(2008年),145~155和155~165 m海拔各土层有机质含量均显著($P<0.05$)高于对照海拔175~185 m,而海拔165~175 m处0~10 cm土层有机质含量与对照海拔相比差异显著($P<0.05$),在10~20 cm土层差异不显

著。海拔145~155、155~165和165~175 m 0~10 cm土层有机质含量在经历7次水位涨落后(2015年)均显著降低,降幅分别为35.8%、35.6%和33.1%,而10~20 cm土层pH值在经历1次水位涨落后显著增加,而在经历4、6和7次水位涨后,各水淹海拔有机质含量均逐年降低。

表2 各海拔不同土层土壤有机质含量变化特征

Tab.2 Characteristics of soil organic matter content variation in different soil layers at different altitudes g·kg⁻¹

土层 Soil layer/cm	海拔 Altitude/cm	年份 Year				
		2008	2009	2012	2014	2015
0~10	145~155	35.26±2.702Aa	28.66±3.103Aba	33.65±4.936Aa	28.02±0.363Aba	22.64±0.587Ba
	155~165	34.54±2.69Aa	27.18±3.379ABCa	31.90±5.445Abb	24.45±0.557Abb	22.25±2.068Ca
	165~175	29.42±4.252Ab	24.10±2.808Ab	29.91±3.269BCb	23.00±0.05ABb	20.83±1.98Ba
	175~185	26.11±2.42Ac	21.33±1.624Abc	25.68±4.143Ac	20.47±0.06Abc	17.47±0.99Bb
10~20	145~155	21.64±2.977Ba	30.99±0.029Aa	27.30±2.818Aa	19.37±2.906Ba	18.58±2.058Ba
	155~165	17.90±2.357Bb	26.48±0.105Ab	18.9±2.672Bb	18.46±2.118Ba	17.46±5.38Ba
	165~175	12.73±0.694Bc	25.04±0.702Ab	15.9±2.672Bc	13.78±0.979Bb	12.57±1.365Bb
	175~185	11.68±0.73Bc	23.24±0.06Ac	13.53±1.16Bc	11.81±0.304Bc	10.89±0.182Bb

整体来讲,水淹前期0~10 cm土层总体有机质含量较10~20 cm土层高,但经历7次水位涨落后,两土层趋向一致,说明0~10 cm土层有机质流失严重。双因素分析可知:消落带不同土层不同海拔土壤有机质含量变化同时受年限、海拔梯度各自独立作用的影响显著($P<0.01$)。

3.3 各海拔不同土层碱解氮含量7年间变化特征

由表3可以看出,水淹前期(2008年),海拔

145~155和155~165 m 10~20 cm土层的碱解氮含量与对照海拔175~185 m相比差异显著,海拔165~175 m 0~10和10~20 cm土层土壤碱解氮含量与175~185 m相比则差异不显著,且0~10 cm土层以海拔155~165 m最高、10~20 cm土层以海拔165~175 m最高,分别为97.96和79.22 mg·kg⁻¹。随着水淹时间增加,对照海拔的0~10 cm土层碱解氮经历1次水位涨落后显著降低($P<0.05$),然后经历4

次水位涨落后显著增加,增幅达18.4%;而10~20 cm土层碱解氮含量则在此期间一直未有明显变化。海拔145~155、155~165和165~175 m处0~10 cm土层碱解氮变化规律与对照海拔相同。

整体来讲,海拔145~155、155~165和165~175 m处0~10土层碱解氮在经历1、4、6和7次水

位涨落后的变化规律为先降低后增加再降低;而10~20 cm土层碱解氮则大多表现为先增加后降低。双因素分析可知:各海拔不同土层土壤碱解氮含量同时受年限、海拔梯度及其交互作用的影响($P < 0.01$)。

表3 各海拔不同土层土壤碱解氮含量变化特征

Table.3 Characteristics of soil available N content variation in different soil layers at different altitudes mg·kg⁻¹

土层 Soil layer/cm	海拔 Altitude/cm	年份 Year				
		2008	2009	2012	2014	2015
0~10	145~155	93.54±1.09Ba	51.14±1.466Cb	102.73±1.051Aa	90.72±1.625Ba	46.21±0.05Ca
	155~165	97.96±0.18Ba	47.64±5.746Cb	112.09±9.761Aa	75.99±3.427Bc	33.60±5.38Cb
	165~175	92.73±1.91Ba	58.24±0.549Ca	90.43±8.648Ab	82.90±3.478Bb	32.69±4.04Cb
	175~185	89.28±1.374Ba	40.44±0.849Cb	105.71±0.899Aa	85.98±0.827Bb	33.07±2.325Cb
10~20	145~155	55.90±6.564Bb	60.43±0.583Abb	71.90±7.193Aa	72.96±7.159Aa	44.68±10.455Ba
	155~165	49.47±9.589Bb	82.73±0.223Aa	60.37±6.125ABb	60.47±3.217ABB	31.62±0.095Cb
	165~175	79.22±7.226Aa	56.25±10.36Bb	55.06±7.767Bc	50.12±9.281Bc	33.86±4.765Cb
	175~185	62.73±7.206Aa	71.34±3.523Aa	61.55±4.455ABB	59.48±2.793ABB	27.94±0.445Cb

3.4 各海拔不同土层速效钾含量7年间变化特征

由表4可以看出,水淹前期(2008年),海拔145~155、155~165和165~175 m处0~10 cm土层速效钾与对照海拔(175~185 m)相比均差异性显著,且海拔165~175 m两土层的速效钾含量均最高,分别为0.078和0.05 g·kg⁻¹。对照海拔0~10 cm土层速效钾含量在经历1,4,6和7次水位涨落后的显著降低,较2008年分别降低43.1%,31.4%,7.8%和56.9%;对照海拔10~20 cm土层速效钾含量在经历7次水位涨落后的显著降低,较2008年降低39.3%。海拔145~155、155~165和165~175 m两土层速效钾变化规律与对照海拔大致

相同,至2015年,海拔155~165和165~175 m处0~10 cm土层土壤速效钾含量分别下降60.3%和67.9%,海拔155~165和165~175 m处10~20 cm土层速效钾含量分别下降了43.2%和66.0%,且差异极显著($P < 0.01$)。

整体来讲,水淹前期样地内土壤速效钾含量较高,但在经历7次水位涨落后的海拔155~165和165~175 m两土层速效钾流失严重。

双因素分析可知:消落带各海拔两土层土壤速效钾含量同时受年限($P < 0.01$)及年限与海拔的交互作用($P < 0.01$)的影响。

表4 各海拔不同土层土壤速效钾含量变化特征

Table.5 Characteristics of soil available K content variation in different soil layers at different altitudes g·kg⁻¹

土层 Soil layer/cm	海拔 Altitude/cm	年份 Year				
		2008	2009	2012	2014	2015
0~10	145~155	0.035±0.003ABd	0.029±0.003Bb	0.029±0.004Bb	0.045±0.003Aa	0.039±0.001Aa
	155~165	0.063±0.005Ab	0.036±0.004Bb	0.033±0.006Bb	0.04±0.001Bb	0.025±0Bb
	165~175	0.078±0.003Aa	0.04±0.002Ba	0.03±0.005Bb	0.038±0.002Cb	0.025±0Bb
	175~185	0.051±0.004Ac	0.029±0.003Bb	0.035±0.007Ba	0.047±0.001Ba	0.022±0.002Bb
10~20	145~155	0.032±0.002Ac	0.03±0.004Ab	0.019±0.001Bb	0.036±0.003Aa	0.03±0.005Aa
	155~165	0.044±0.004Ab	0.034±0.006Ba	0.021±0.003Cb	0.032±0.003Bb	0.025±0.005Cb
	165~175	0.05±0.002Aa	0.035±0.003Ba	0.012±0.004Cc	0.03±0.002Bb	0.017±0.002Cc
	175~185	0.028±0.004ABC	0.032±0.001Aa	0.029±0.003ABA	0.035±0.003Aa	0.017±0.004Bc

3.5 各海拔不同土层速效磷含量7年间变化特征

由表5可以看出,水淹前期(2008年),海拔155~165 m处0~10 cm土层和海拔145~155 m处10~20 cm土层速效磷含量最高,分别为50.9和36.9 g·kg⁻¹。随着水淹时间增加,对照海拔两土层

速效磷在经历4、6和7次水位涨落后的显著降低,0~10 cm土层速效磷含量较2008年分别降低42.8%、94.8%和94.8%,10~20 cm土层速效磷含量较2008年分别降低45.4%、89.8%和93.3%。海拔145~155、155~165和165~175 m两

土层速效磷变化规律与对照海拔相同,至2015年,0~10 cm土层土壤速效磷含量分别下降78.0%、94.8%和91.6%,10~20 cm土层分别下降89.5%、93.6和92.5%,且差异均显著($P<0.05$)。

整体来讲,海拔145~155、155~165、165~175和175~185 m两土层土壤速效磷含量均表现为2008年>2009年>2012年>2014年>2015年。两土层各

海拔速效磷含量均表现为逐年降低。

双因素分析可知:消落带0~10 cm土层各海拔间土壤速效磷含量同时受年限、海拔梯度及其交互作用的影响($P<0.01$),10~20 cm土层各海拔间土壤速效磷含量同时受年限($P<0.01$)和海拔梯度($P<0.05$)的影响。

表5 各海拔不同土层土壤速效磷含量变化特征

Tab.5 Characteristics of soil available P content variation in different soil layers at different altitudes mg·kg⁻¹

土层 Soil layer/cm	海拔 Altitude/cm	2008	2009	2012	2014	2015
0~10	145~155	36.72±1.278Eb	36.38±1.925Da	20.95±0.274Ca	11.58±3.117Ba	8.09±1.405Aa
	155~165	50.85±1.23Ea	32.00±1.927Db	22.55±2.357Ca	8.23±1.352Bb	2.65±0.355Ab
	165~175	19.91±0.465Ec	25.97±2.11Dc	14.26±0.698Cb	4.35±0.133Bc	1.68±0.125Ab
	175~185	40.35±0.465Eb	21.32±2.11Dd	23.10±0.698Ca	2.11±0.133Bc	2.10±0.125Ab
10~20	145~155	36.88±3.735Ea	20.21±2.467Da	18.45±2.927Ca	6.64±3.842Ba	3.87±0.16Aa
	155~165	31.98±2.874Eb	10.73±1.047Db	5.68±1.396Cb	4.41±1.518Bb	2.06±0.385Aa
	165~175	14.79±2.557Ed	8.22±3.176Db	4.42±3.127Cb	4.13±1.419Bb	1.11±0.05Aa
	175~185	22.69±1.532Ec	20.07±2.927Da	12.40±2.425Ca	2.32±0.365Bc	1.51±0.015Aa

4 讨论

石孝洪等(2004)研究表明:不论土壤初始状态是酸性还是碱性,淹水后pH值均逐渐趋于中性。本研究发现:经历7次水位涨落后,海拔155~165、165~175和175~185 m两土层pH值由水淹前期4.9~5.3升高至6.3~8.2,土壤逐渐趋于中性,这与一些已有研究的结论相吻合(王晓荣等,2010;郭泉水等,2012;程瑞梅等,2017);而海拔145~155 m处两土层pH值则由5.7和6.1均升高至8.2,已由酸性土转为碱性土,与以往研究有一定差异。这可能是由于海拔越低,其所受淹水时间越长,淹水深度越大,对土壤pH值的影响更为显著。一方面,消落带内土壤遭受长时间的浸泡,其稀释作用使得土壤pH值升高;另一方面,水淹后期大量枯枝落叶被江水冲走,使得土壤有机质供给量减少;加之水流作用在一定程度上加速了有机质的分解(Paul *et al.*, 2001),也使得土壤pH值逐渐升高。再者,土壤母岩风化产生的呈碱性的包括镁、钠等在内的碱性氧化物的存在也在一定程度中和了土壤酸度(王晓荣等,2010),从而使得土壤酸碱度发生变化。另除上述因素外,水库运行后由森林变为灌丛以后的林地环境改变、研究期间气候变化及人类活动等因素也在一定程度会影响土壤酸碱度的变化。

王晓荣等(2010)、郭泉水等(2012)在探究三峡库区初期土壤养分特征结果时发现:经历1次水位涨落后,秭归段土壤有机质含量显著下降。程瑞梅

等(2017)研究库区土壤在经历4次水位涨落后,根据全国第二次土壤普查养分分级标准得出土壤有机质含量显著下降,等级已由4级降至5级。本次研究同样证明了这个结论。在本研究中,水库运行后各水淹海拔0~10和10~20 cm土层有机质含量都比对照海拔段有所增加,这可能是由于长期的淹水环境使得土壤处于强还原状态,有利于有机质的形成,并且矿化作用较低,也使得有机质处于积累状态(杨洪昇等,2015)。同时,随着水位涨落年限的增加,淹水胁迫程度逐渐增大,各海拔0~10 cm土层土壤有机质含量表现为先增加后减少的变化趋势($P>0.05$),这可能是因为水淹刚开始时,一定强度的淹水有利于有机质和全氮的积累,但随着水淹年限的增加,植被的减少导致土壤无枯落物返还,从而影响有机养分的积累,进而使得土壤表层有机质迅速分解而缺乏补给(Liu *et al.*, 2014;杨洪昇等,2015)。而10~20 cm土层有机质含量变化趋势较0~10 cm复杂,呈现先增加后降低的变化趋势,这可能是由于三峡库区运行初期,许多陆生植物因不适应淹没状态而死亡,大量堆积的植被残体在短时间返还土壤,进而增加土壤有机质含量(Liu *et al.*, 2014),但随水淹年限增加导致可生存植被减少,使得土壤有机质补给来源减少,进而又降低了土壤中有机质含量。

碱解氮属于有效氮,长期的淹水过程会流失掉水体内大部分土壤氮素(Pérez *et al.*, 1999),这符合范小华等(2006)所提出的“周期性水淹过程会加

速土壤对营养物质的机械吸收、阻留、沉淀等过程,同时加速土壤养分的释放、运动和扩散过程”这一规律。本研究得出经历7次水位涨落后,土壤碱解氮含量均已显著低于水淹前期,降幅分别达50.6%~65.7%和20.1%~57.3%,且0~10、10~20 cm层土壤碱解氮含量均出现先增加后降低的变化趋势。分析原因可知,水淹初期,碱解氮含量受水体内氮含量影响而使得表层土壤中碱解氮含量升高,但是由于氮元素分解、转换周期长,长时间的水淹胁迫导致土壤通气状况不佳,反而使得有机物作为反硝化细菌的电子供体及碳源、氮氧化物(离子和气态的形式)为最终电子受体,从而影响氮素循环(Vymazal *et al.*, 2007),进而降低了土壤中有效氮素的含量。再者,土壤氮含量的高低还与自身转换周期息息相关:水淹初期,土壤在好氧淹水条件下会像上覆水体中释放氨氮和硝态氮,且吸附的氨态氮越多,土壤淹水过程中释放到上覆水体中量越多,而且初期土壤吸附大于释放,碱解氮含量逐渐升高;而水淹中期土壤吸附小于释放,碱解氮含量则逐渐降低(詹艳慧等,2006)。另外,pH值的升高也会减少上覆水中氨态氮的累积量,从而导致土壤碱解氮含量降低(陶玉炎等,2013)。

与碱解氮不同,土壤速效钾、速效磷主要来源于母质风化及植物从土壤底层的大量吸收和积累(王晓荣等,2010)。本研究得出,所测年限内0~10 cm较10~20 cm土层速效钾含量高,这符合刘贤德等(2013)提出的土壤养分呈现明显的“表聚现象”这一理论,且0~10和10~20 cm土层速效钾在经历长期淹水条件后呈现先增加后降低的变化规律;由水淹因素导致的水淹中期各海拔土壤速效钾含量变化范围分别为14.7%~68.8%、3.2%~26.0%和6.8%~43.7%(0~10 cm)及12.8%~41.2%,5.9%~52.7%和27.7%~72.2%(10~20 cm)。一方面,水位涨落的冲刷带走一部分钾元素,进而速效钾含量下降;另一方面,受土壤有机质的保钾作用(刘世全等,2005)影响,消落带有机质的减少也造成土壤速效钾含量逐渐下降。另外,至2015年,0~10 cm土层较10~20 cm土层速效钾含量下降幅度更大,受水淹影响更敏感,这可能是因为0~10 cm土层土壤直接受水体侵蚀而丧失掉更多的钾元素。

此外,土壤速效磷含量是研究区内流失量最大的化学元素,0~10和10~20 cm土层速效磷含量随水位涨落的增加而逐年下降,且差异显著。至2015年,各水淹海拔0~10 cm土层速效磷含量在水淹中期下降幅度分别达45.4%,82.2%和90.2%(0~

10 cm)及61.5%、83.5%和92%(10~20 cm)。这可能是由于水动力的增强增加了沉积物向水体释放的磷量(Søndergaard *et al.*, 1992),而且消落带的水位周期性涨落引起的水文扰动促进了磷素的物理释放,进而加速了磷素水土界面的转化和释放过程(程瑞梅等,2017)。同时长时间的淹水-落干过程在一定程度上可使吸附一定外源性磷的土壤在淹水条件下释放更多的磷,因此,水淹年限的延长可使土壤处于强还原状态下,进而使得土壤中沉积态磷素发生还原反应溶解最终导致速效磷含量减少(Watts *et al.*, 2000)。另外本区域土壤颗粒间间隙较大,速效养分在土壤颗粒间不断迁移,可能也使得土壤中速效磷含量不断下降。

5 结论

对三峡库区秭归段消落带未水淹以及经历1、4、6和7次水位涨落后的土壤化学性质特征的分析表明:经历7次水位涨落,海拔155~165,165~175和175~185 m消落带土壤pH值趋于中性,145~155 m则趋于碱性,但消落带土壤养分元素(有机质、碱解氮、速效钾、速效磷)均出现不同程度的流失,尤以速效磷含量流失最为严重,消落带土壤养分匮乏现象突显。对于消落带经历长期水位涨落后的土壤化学性质变化仍需长期监测。

参 考 文 献

- 常超,谢宗强,熊高明,等. 2009. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征. 生态学报, 29(11):5978~5985.
- (Chang C, Xie Z Q, Xiong G M, *et al.* 2009. Characteristics of soil nutrients of different vegetation types in the Three Gorges reservoir area. *Acta Ecologica Sinica*, 29(11):5978~5985. [in Chinese])
- 常超,谢宗强,熊高明,等. 2011. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响. 自然资源学报, 26(7):1236~1244.
- (Chang C, Xie Z Q, Xiong G M, *et al.* 2011. The effect of flooding on soil physical and chemical properties of riparian zone of in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Natural Resources*, 26(7):1236~1244. [in Chinese])
- 程瑞梅,刘泽彬,肖文发,等. 2017. 三峡库区典型消落带土壤化学性质变化. 林业科学, 53(2):19~25.
- (Cheng R M, Liu Z B, Xiao W F, *et al.* 2017. Changes of soil chemical properties in typical hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(2):19~25. [in Chinese])
- 范小华,谢德体,魏朝富. 2006. 水、土环境变化下消落区生态环境问题研究. 中国农学通报, 22(10):374~379.
- (Fan X F, Xie D T, Wei C F. 2006. Study on the ecological environmental problems of the riparian zone under interactions of the soil and water. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 22(10):374~379. [in Chinese])

- 傅杨武,陈明君,潘 杰,等.2010.三峡库区消落带淹水后土壤性状变化的动态模拟.安徽农业科学,38(20):10783-10784.
- (Fu Y W, Chen M J, Pan J, et al. 2010. Dynamic simulation of change in soil property of flooded-belt in Three Gorges Reservoir Area after flooding. Journal of Anhui Agriculture Science, 38 (20) : 10783 - 10784. [in Chinese])
- 国家林业局.2000.森林土壤分析方法.北京:中国标准出版社.(State Forestry Administration. 2000. Determination methods of forest soils. Beijing: Standards Press of China. [in Chinese])
- 郭泉水,康 义,赵玉娟,等.2012.三峡库区消落带土壤氮磷钾、pH值和有机质变化.林业科学,48(3):7-10.
- (Guo Q S, Kang Y, Zhao Y J, et al. 2012. Changes in the contents of N, P, K, pH and organic matter of the soil which experienced the hydro-fluctuation in the Three Gorges Reservoir. Scientia Silvae Sinicae, 48 (3) : 7-10. [in Chinese])
- 贾国梅,何 立,刘 潇,等.2016.三峡库区消落带土壤有机碳氧化稳定性特征.水土保持研究,23(5):14-19.
- (Jia G M, He L, Liu X, et al. 2016. Characteristics of soil oxidizable stable organic carbon in riparian of Three Gorges Reservoir. Research of Soil and Water Reservation, 23 (5) : 14-19. [in Chinese])
- 刘世全,高丽丽,蒲玉琳,等.2005.西藏土壤磷素和钾素养分状况及其影响因素.水土保持学报,19(1):75-78.
- (Liu S Q, Gao L L, Pu Y L, et al. 2005. Status of soil P and K nutrient and their influencing factors in Tibet. Journal of Soil and Water Conservation, 19 (1) : 75-88. [in Chinese])
- 刘贤德,赵维俊,张学龙,等.2013.祁连山排露沟流域青海云杉林土壤养分和pH变化特征.干旱区研究,30(6):1013-1020.
- (Liu X D, Zhao W J, Zhang X L, et al. 2013. Variation of soil nutrient content and pH value under *Picea crassifolia* forest in the Pailugou Drainage Basin in the Qilian Mountains. Arid Zone Research, 30 (6) : 1013-1020. [in Chinese])
- 刘泽彬.2014.三峡库区消落带两种植物对淹水环境适应性的模拟研究.北京:中国林业科学研究院硕士学位论文.
- (Liu Z B. 2014. A simulation study on the adaptability of two plants in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir Region to flooding. Beijing: MS thesis of Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 任庆水,马 朋,李昌晓,等.2016.三峡库区消落带落羽杉(*Taxodium distichum*)与柳树(*Salix matsudana*)人工植被对土壤营养元素含量的影响.生态学报,36(20):6431-6444.
- (Ren Q S, Ma P, Li C X, et al. 2016. Effects of *Taxodium distichum* and *Salix matsudana* on the contents of nutrient elements in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 36 (20) : 6431-6444. [in Chinese])
- 沈雅飞,王 娜,刘泽彬,等.2016.三峡库区消落带土壤化学性质变化.水土保持学报,30(3):190-195.
- (Shen Y F, Wang N, Liu Z B, et al. 2016. Changes of the soil chemical properties in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir. Journal of Soil and Water Conservation, 30 (3) : 190 - 195. [in Chinese])
- 石孝洪.2004.三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化.中国土壤与肥料,(1):40-42.
- (Shi X H. 2004. Eutropication and phosphorus release of soil in drawdown area of Three Gorges Reservoir. Soil and Fertilizer Sciences in China, (1) :40-42. [in Chinese])
- 苏维词,杨 华,罗有贤,等.2003.三峡库区涨落带的主要生态环境问题及其防治措施.水土保持研究,10(4):196-198.
- (Su W C, Yang H, Luo Y X, et al. 2003. Eco-environmental problems of the water-level-fluctuating zone in Three-Gorges Reservoir and their counter measures. Research of Soil and Water Conservation, 10 (4) : 196-198. [in Chinese])
- 陶玉炎,耿金菊,王荣俊,等.2013.环境条件变化对河流沉积物“三氮”释放的影响.环境科学与技术,(s1):41-44.
- (Tao Y Y, Geng J J, Wang R J, et al. 2013. Influence of environmental conditions on the release of “three nitrogen” in river sediments. Environmental Science & Technology, (s1) :41-44. [in Chinese])
- 王改改,傅瓦利,魏朝富,等.2008.消落带土壤铁的形态变化及其对有效磷的影响.土壤通报,39(1):68-72.
- (Wang G G, Fu W L, Wei C F, et al. 2008. Iron transformation and phosphorus availability in a drawdown area of Three Gorges Reservoir. Chinese Journal of Soil Science, 39 (1) : 68 - 72. [in Chinese])
- 王晓锋,袁兴中,刘 红,等.2015.三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态.环境科学,36(10):3662-3673.
- (Wang X F, Yuan X Z, Liu H, et al. 2015. Nutrient characteristics and nitrogen forms of rhizosphere soil under four typical plants in the littoral zone of TGR. Environment Science, 36 (10) : 3662 - 3673. [in Chinese])
- 王晓荣,程瑞梅,肖文发,等.2010.三峡库区消落带初期土壤养分特征.生态学杂志,29(2):281-289.
- (Wang X R, Cheng R M, Xiao W F, et al. 2010. Soil nutrient characteristics in juvenile water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir. Chinese Journal of Ecology, 29 (2) : 281 - 289. [in Chinese])
- 王娅微,陈芳清,张 森,等.2016.三峡库区水位消涨对杉木溪消落带土壤性质的影响.水生态学杂志,37(3):56-61.
- (Wang Y J, Chen F Q, Zhang M, et al. 2016. Response of nutrient levels and spatial distribution to water-level fluctuation on the Shamu riverbanks in the Three Gorges Reservoir Area. Journal of Hydroecology, 37 (3) : 56-61. [in Chinese])
- 杨洪昇,田 昆,姚 茜,等.2015.筑坝蓄水对高原湿地拉市海土壤有机质和全氮分布格局的影响.生态学杂志,34(1):162-167.
- (Yang H S, Tian K, Yao Q et al. 2015. The impacts of dam impoundment on the distribution patterns of soil organic matter and total nitrogen in Lashihai plateau wetland. Chinese Journal of Ecology, 34 (1) : 162-167. [in Chinese])
- 杨予静,李昌晓,马 朋.2015.三峡水库城区消落带人工草本植被土壤养分含量研究.草业学报,24(4):1-11.
- (Yang Y J, Li C X, Ma P. 2015. Nutrient content of soils under artificial grass vegetation in the urban hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Region. Acta Prataculturae Sinica, 24 (4) : 1-11. [in Chinese])
- 袁 辉,王里奥,胡 刚,等.2008.三峡库区消落带受淹土壤氮和磷释放的模拟实验.环境科学研究,21(1):103-106.
- (Yuan H, Wang L A, Hu G, et al. 2008. Release of N, P from submerged soil in the shore-area of Three Gorges Reservoir. Research of Environmental Science, 21 (1) : 103-106. [in Chinese])

- 詹艳慧, 王里奥, 焦艳静. 2006. 三峡库区消落带土壤氮素吸附释放规律. 重庆大学学报: 自然科学版, 29(8):10-13.
- (Zhan Y H, Wang L A, Jiao Y J. 2006. Adsorption & release of nitrogen of soil in Three Gorges Reservoir. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 29(8):10-13. [in Chinese])
- 章 程. 2009. 典型岩溶泉流域不同土地利用方式土壤营养元素形态及其影响因素. 水土保持学报, 23(4):165-169.
- (Zhang C. 2009. Speciation of soil nutrient elements and their controlling factors in different land-uses of typical Karst Spring Watershed. Journal of Soil and Water Conservation, 23 (4): 165 - 169. [in Chinese])
- 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 2004. 三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究. 水土保持学报, 18(6):120-123.
- (Zhang J Y, Wang D Y, Shi X H. 2004. Change of soil character after flooding in drawdown area of Three Gorges Reservoir. Journal of Soil and Water Conservation, 18(6):120-123. [in Chinese])
- 张希彪, 上官周平. 2006. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. 生态学报, 26(11):3685-3695.
- (Zhang X B, Shangguan Z P. 2006. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinustabulae formis* Carr. forests of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 26(11):3685-3695. [in Chinese])
- 中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社.
- (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. 1978. Analysis of soil physico-chemical properties. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. [in Chinese])
- 朱妮妮, 郭泉水, 秦爱丽, 等. 2015. 三峡水库奉节以东秭归和巫山段消落带植物群落动态特征. 生态学报, 35(23):7852-7867.
- (Zhu N N, Guo Q S, Qin A L, et al. 2015. Plant community dynamics in the hydro fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir at the Zigui and Wushan Section, east of Fengjie County, China. *Acta Ecologica Sinica*, 35(23):7852-7867. [in Chinese])
- Adejuwon J O, Ekanade O. 1988. A comparison of soil properties under different landuse types in a part of the Nigerian cocoa belt. *Catena*, 15 (3):319-331.
- Liu Z, Cheng R, Xiao W, et al. 2014. Effect of off-season flooding on growth, photosynthesis, carbohydrate partitioning, and nutrient uptake in *Distylium chinense*. *Plos One*, 9(9):e107636.
- Paul K I, Black A S, Conyers M K. 2001. Effect of plant residue return on the development of surface soil pH gradients. *Biology and Fertility of Soils*, 33(1):75-82.
- Pérez J M S, Trémolieres M, Takatert N, et al. 1999. Quantification of nitrate removal by a flooded alluvial zone in the III floodplain (Eastern France). *Hydrobiologia*, 410(1):185-193.
- Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. 1992. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiologia*, 228(1):91-99.
- Vymazal J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1/3):48-65.
- Watts C J. 2000. The effect of organic matter on sedimentary phosphorus release in an Australian reservoir. *Hydrobiologia*, 431(1):13-25.
- Ye C, Cheng X, Zhang Q. 2014. Recovery approach affects soil quality in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China: implications for revegetation. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(3):2018.
- Ye C, Cheng X, Zhang Y, et al. 2012. Soil nitrogen dynamics following short-term revegetation in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Engineering*, 38 (1): 37-44.

(责任编辑 于静娴)