

三峡水库峡谷地貌区消落带土壤氮磷钾、有机质含量和 pH 值的时空动态

简尊吉¹ 裴顺祥² 郭泉水^{1*} 秦爱丽¹ 马凡强¹ 赵玉娟¹ 肖文发¹ 康义³

(¹中国林业科学研究院森林生态与环境保护研究所/国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; ²中国林业科学研究院华北林业实验中心, 北京 102300; ³河北省塞罕坝机械林场, 河北围场 068450)

摘要 基于三峡水库巫山段和秭归段消落带海拔 155~172 m 区段经历水库水位涨落前(2008年)和经历 1 次(2009年)、4 次(2012年)、7 次(2015年)水库水位涨落后土壤化学性质的长期定位监测, 研究峡谷地貌区消落带土壤氮(N)、磷(P)、钾(K)、有机质(OM)含量和 pH 值的时空动态变化规律, 并对其养分状态进行评价。结果表明: 随着经历水库水位涨落次数的增多, 消落带土壤全氮(TN)、速效氮(AN)、速效钾(AK)和 OM 含量减少, 全磷(TP)、全钾(TK)、速效磷(AP)含量和 pH 值增加; 经历水库水位涨落前和经历 1 次水库水位涨落后, 消落带各土层的 TP、TK 和 AP 含量为巫山样地>秭归样地, 经历 4 次和 7 次水库水位涨落后, 变为秭归样地>巫山样地; 随着经历水库水位涨落次数的增多, 消落带大多数土壤化学指标含量在土层间的差异减小。对照全国第二次土壤普查养分分级标准, 经历 7 次水库水位涨落后, 秭归样地土壤 TP 和 AP 含量达到极高等级, 巫山样地土壤 AP 含量为高等级, 其他指标为中等及以下等级。三峡水库的水文特征、人为活动的干扰, 以及不同土壤化学指标性质的差异, 是峡谷地貌区消落带土壤 N、P、K、OM 含量和 pH 值时空变化的主要驱动因素。

关键词 土壤化学性质; 时空动态; 消落带; 三峡水库; 峡谷地貌区

Temporal and spatial dynamics of soil nitrogen, phosphorus, potassium, organic matter and pH in the water level fluctuation zone of canyon landform area of the Three Gorges Reservoir, China. JIAN Zun-ji¹, PEI Shun-xiang², GUO Quan-shui^{1*}, QIN Ai-li¹, MA Fan-qiang¹, ZHAO Yu-juan¹, XIAO Wen-fa¹, KANG Yi³ (¹Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; ²Experimental Center of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China; ³Saihanba Mechanized Forest Farm of Hebei, Weichang 068450, Hebei, China).

Abstract: Based on the long-term monitoring data of soil chemical properties before never experiencing water level fluctuation (2008) and after experiencing 1 time (2009), 4 times (2012), 7 times (2015) of water level fluctuation in the water level fluctuation zone with the altitude of 155-172 m, located at the Wushan and Zigui section of the Three Gorges Reservoir (TGR), the temporal and spatial dynamics of soil nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), organic matter (OM) and pH value were studied and their nutrient status were evaluated. The contents of soil total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), available potassium (AK) and OM gradually decreased with the increasing times of experiencing water level fluctuation, while the contents of total phosphorus (TP), total potassium (TK) and available phosphorus (AP), and pH value exhibited the opposite trend. The contents of TN, TK and AP in different soil layers displayed as Wushan > Zigui before never experiencing water level fluctuation and after experiencing 1 time of water level fluctuation. However, after experiencing 4 times and 7 times of water level fluctuation, they changed as

本文由“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B040301)资助 This work was supported by the National Science and Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period (2015BAD07B040301).

2016-12-20 Received, 2017-05-25 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoqs@caf.ac.cn

Zigui > Wushan. Differences of soil chemical indicators in different soil layers gradually decreased with the increasing times of experiencing water level fluctuation. Compared with the nutrient classification standard of the national second soil census, the contents of TP and AP were extremely high grade in Zigui plot and the content of AP was high grade in Wushan plot after experiencing 7 times of water level fluctuation, and other soil indicators were in the middle or below grade. The hydrological regime characteristics of the TGR and the interference of human activities, as well as the differences of soil chemical indicators in nature were the major driving factors that caused the temporal and spatial dynamics of soil N, P, K, OM and pH in the water level fluctuation zone of canyon landform area of the TGR.

Key words: soil chemical property; temporal and spatial dynamics; water level fluctuation zone; Three Gorges Reservoir; canyon landform area.

三峡水库消落带是水域和陆地生态系统能量流动和物质循环最为活跃的生态脆弱带^[1-4]. 消落带土壤是能量输移和物质转化的重要场所. 受水库水位周期性涨落的影响, 消落带水土环境发生了巨大变化, 土壤理化性状势必发生相应的改变^[5], 并引发一系列生态环境问题^[6-8].

土壤化学元素含量的变化是引起其他特性发生改变的主要原因之一^[9]. 土壤氮(N)、磷(P)、钾(K)、有机质(OM)和pH值是土壤化学性质的重要指标. 近年来, 众多学者围绕三峡水库消落带的土壤化学性质进行了广泛的调查和研究, 并取得了显著成果^[9-14]. 但这些成果多是在消落带形成初期, 通过在消落带大尺度空间上的一次性调查, 或对某一监测点进行短期监测的基础上完成的. 有研究表明, 在消落带形成初期, 很多陆生植物因难以适应水陆生境交替变化而死亡, 而新生植被尚未充分发育^[15]. 失去植被保护的土壤, 在水库水位涨落和涌浪的冲刷下, 土壤流失极为严重^[16]. 另外, 库区的营养盐污染也尚未得到有效控制. 受其综合影响, 土壤化学性质年际间的变化会出现较大的波动, 基于此总结出的变化规律和趋势必然会存在较大的不确定性. 土壤是生物、气候、母质、地形、时间等自然因素和人类活动综合作用的产物. 因此, 基于某一监测点得出的研究结果, 只能反映其在某一具体研究区域的变化特征. 三峡水库峡谷地貌区消落带坡度大、土层薄, 土壤冲刷严重, 为三峡水库沿岸滑坡、崩塌等地质灾害多发区. 巫山段和秭归段为其腹地. 世界高度关注三峡水利工程的生态环境问题, 峡谷地貌区是其焦点之一. 但目前尚未对三峡水库峡谷地貌区消落带土壤化学性质时空动态进行系统的研究.

本文基于三峡水库巫山段和秭归段消落带海拔155~172 m 区段经历水库水位涨落前(2008年)、经历1次(2009年)、4次(2012年)、7次(2015年)水

库水位涨落后土壤化学性质的长期定位监测, 研究消落带土壤N、P、K、有机质含量和pH值的时空动态变化规律, 并对土壤养分状态进行评价. 以期对三峡水库峡谷地貌区消落带土壤生态风险防控和生态修复, 以及水库水环境保护提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

固定监测样地设在三峡水库主干线巫山段和秭归段消落带内.

巫山监测样地(简称巫山样地, 31°4' N, 109°55' E), 坡度41°, 坡向WN25°, 周边区域年均气温18.4℃, ≥10℃年积温5857.3℃, 无霜期305 d, 年均降水量1049.3 mm, 属亚热带季风气候. 消落带原生植被为次生灌丛, 郁闭度0.8, 主要植物种类有: 木槿(*Hibiscus syriacus*)、金丝梅(*Hypericum patulum*)和刺叶冬青(*Ilex bioritsensis*)等; 枯落物覆盖度60%. 土壤类型为石灰岩母质上发育的黄色石灰土, 土层厚度约35 cm. 经历7次水库水位涨落后(2015年), 枯落物几乎被冲刷殆尽, 岩石裸露面积在60%以上, 残存的土壤多见于岩石缝隙中; 消落带植被主要由狗尾草(*Setaria viridis*)等一年生草本植物组成.

秭归监测样地(简称秭归样地, 30°53' N, 110°53' E), 坡度36°, 坡向WN16°, 与巫山样地相距120 km. 周边区域年均温18.0℃, ≥10℃年积温5723.6℃, 无霜期306 d, 年均降雨量1100 mm. 气候类型与巫山样地周边区域相同. 消落带原生植被为马尾松(*Pinus massoniana*)人工林, 林龄20 a左右, 郁闭度0.5. 林下植被盖度85%以上, 主要植物种类有: 白背叶(*Mallotus apelta*)和棕叶狗尾草(*Setaria palmifolia*)等; 枯落物覆盖度70%. 土壤类型为花岗岩母质上发育的黄壤土, 平均土层厚度40 cm. 2008年春季, 根据水库管理部门规定, 对样地上的乔木和

高大灌木进行了砍伐.经历7次水库水位涨落后,土层厚度降至35 cm;植被以草本植物为主,主要植物种类有:金色狗尾草(*Setaria glauca*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、毛马唐(*Digitaria chrysoblephara*)和苍耳(*Xanthium sibiricum*)等.

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 样地底边设在海拔155 m处,宽度15 m,顶边设在海拔172 m处.设置时间为2008年8月.由于2008年年底三峡水库最高水位首次由海拔155 m升至海拔172 m(图1),因此,样地设置时消落带海拔155~172 m区段尚未受到水库水位涨落的影响.

1.2.2 样品采集与处理方法 在样地内,按照中央1个,4角各1个布设采集点.在每个采集点上,按照0~10、10~20、20~30 cm分层采集土壤样品.每个土样质量1 kg左右.土壤处理过程:在实验室内自然风干,去除碎石和植物根系,用玛瑙研钵研磨,过2 mm和100目尼龙筛,用信封保存.土样采集时间分别为2008年8月、2009年8月、2012年8月和2015年8月.每次采样和处理方法相同.

1.2.3 测定指标及测定方法 测定指标包括:全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、有机质(OM)含量和pH值.测定方法参考《森林土壤分析方法》^[17],TN含量测定采用半微量凯氏定氮法,TP和TK含量测定采用硝酸浸提-等离子发射光谱法,AN含量测定采用碱解-扩散法,AP含量测定采用双酸浸提-等离子发射光谱法,AK含量测定采用乙酸铵浸提-等离子发射光谱法,OM含量测定采用重铬酸钾氧化外加热法,pH值测定采用水提-pH酸度计法.测定分析工作在国家林业局森林生态环境重点实验室中国林业科学研

究院森林生态环境与保护研究所分析测试中心完成.

1.3 数据处理

采用Excel 2003和SPSS 19.0软件对数据进行统计分析.采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和Duncan法对不同测定年份,以及不同土层的N、P、K、OM含量和pH值进行方差分析和多重比较,用Mann-Whitney U检验对不同样地土壤N、P、K、OM含量和pH值进行差异显著性检验($\alpha=0.05$),用Pearson法对土壤化学指标进行相关分析.利用Origin 8软件作图.图表中数据为平均值 \pm 标准误.

2 结果与分析

2.1 土壤N、P、K、OM含量和pH值的时间变化

从表1可以看出,随着水库水位涨落次数的增多,消落带土壤N、P、K、OM含量和pH值均发生了不同程度的改变.总的变化规律是:TN、AN、AK和OM含量减少,TP、TK、AP含量和pH值增加.与经历水库水位涨落前(2008年)比较,经历7次水库水位涨落后(2015年),巫山样地0~30 cm各土层的TN、AN、AK和OM平均含量分别减少56.1%、77.6%、18.5%和40.5%,秭归样地分别减少63.3%、80.0%、56.1%和58.4%;巫山样地0~30 cm各土层的TP、TK、AP平均含量和pH值分别增加18.4%、33.5%、435.8%和5.1%,秭归样地分别增加2369.4%、63.8%、5543.3%和50.9%.各土壤化学指标中,变化较大的是土壤N、OM和P含量.

在消落带经历水库水位涨落后的不同测定年份间,大多数土壤化学指标呈时高时低的波动性变化.呈持续减少的只有巫山样地各土层的TN和OM含量以及秭归样地的AN含量,呈持续增加的仅有秭归样地的pH值.各土层的大多数土壤化学指标含量在不同测定年份间差异显著;差异不显著的有巫山样地0~30 cm各土层的TP含量,10~20 cm土层的TK含量,20~30 cm土层的AK和OM含量,以及秭归样地20~30 cm土层的TK含量.

2.2 土壤N、P、K、OM含量和pH值的空间变化

2.2.1 在水平空间的变化 从表1可以看出,随着消落带经历水库水位涨落次数的增多,土壤TP、TK、AP含量以及pH值在样地间的高低分布格局发生了明显变化.经历水库水位涨落前和经历1次水库水位涨落后(2009年),各土层的TP和TK含量,以及10~30 cm各土层的AP含量均表现为巫山样地>秭归样地,但经历4次(2012年)和7次水库水

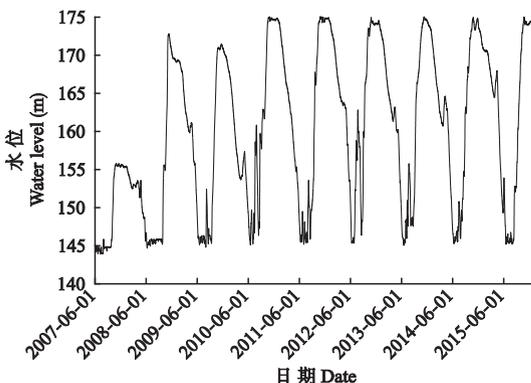


图1 三峡水库水位的变化

Fig.1 Water level fluctuation of the Three Gorges Reservoir.

表 1 土壤化学指标在年际间和水平地理空间上的差异

Table 1 Differences of soil chemical indicators in different years and geographical spaces

土层 Soil layer (cm)	指标 Indicator	样地 Plot	年份 Year			
			2008	2009	2012	2015
0~10	全氮	Ws	2.01±0.32Aa	1.89±0.17Aa	1.51±0.14Aa	0.87±0.71Ab
	TN (g·kg ⁻¹)	Zg	1.41±0.13Aa	1.16±0.20Ba	1.10±0.83Ba	0.37±0.15Bb
	全磷	Ws	0.37±0.02Aa	0.31±0.03Aa	0.38±0.03Aa	0.39±0.03Aa
	TP (g·kg ⁻¹)	Zg	0.14±0.03Ba	0.11±0.01Ba	2.66±0.66Bb	3.06±0.43Bb
	全钾	Ws	1.74±0.12Aa	1.73±0.05Aa	2.21±0.12Aab	2.58±0.38Ab
	TK (g·kg ⁻¹)	Zg	1.78±0.56Aa	1.66±0.14Aa	4.17±0.79Bb	2.86±0.25Aab
	速效氮	Ws	209.76±44.29Aa	111.92±15.22Abc	129.78±12.26Ab	46.44±4.19Ac
	AN (mg·kg ⁻¹)	Zg	150.58±20.31Aa	88.05±11.54Ab	31.50±3.67Bc	29.98±3.75Bc
	速效磷	Ws	1.83±0.22Aa	1.23±0.25Aa	7.72±3.19Ab	10.89±2.82Ab
	AP (mg·kg ⁻¹)	Zg	2.48±0.73Aa	2.10±0.19Ba	115.19±44.52Bb	64.21±7.52Bb
	速效钾	Ws	119.53±9.27Aa	104.75±4.67Aab	121.98±7.22Aa	87.07±5.45Ab
	AK (mg·kg ⁻¹)	Zg	74.56±10.35Ba	40.59±7.06Bb	19.36±1.48Bc	27.36±2.36Bbc
	有机质	Ws	42.29±5.07Aa	39.13±2.76Aa	38.06±3.24Aa	22.85±1.43Ab
	OM (g·kg ⁻¹)	Zg	24.08±1.17Aa	20.21±1.06Ba	23.27±4.80Ba	10.91±2.95Bb
	pH	Ws	7.48±0.08Aa	7.35±0.16Aa	7.58±0.03Aab	7.80±0.09Ab
Zg		5.00±0.26Ba	5.44±0.13Ba	6.48±0.12Bb	8.00±0.28Ac	
10~20	全氮	Ws	1.74±0.24Aa	1.51±0.16Aa	1.42±0.14Aa	0.71±0.15Ab
	TN (g·kg ⁻¹)	Zg	0.56±0.15Bab	0.35±0.03Bac	0.83±0.15Bb	0.13±0.12Bc
	全磷	Ws	0.31±0.03Aa	0.31±0.02Aa	0.35±0.03Aa	0.38±0.04Aa
	TP (g·kg ⁻¹)	Zg	0.11±0.02Ba	0.11±0.01Ba	2.98±1.11Bb	3.00±0.38Bb
	全钾	Ws	1.80±0.14Aa	1.80±0.14Aa	2.09±0.17Aa	2.27±0.13Aa
	TK (g·kg ⁻¹)	Zg	1.68±0.17Aa	1.67±0.15Aa	3.49±0.87Ab	2.85±0.15Aab
	速效氮	Ws	194.10±15.79Aa	87.21±13.51Ab	103.46±8.36Ab	40.79±4.09Ac
	AN (mg·kg ⁻¹)	Zg	85.61±5.25Ba	40.31±2.44Bb	28.42±7.24Bbc	22.95±3.88Bc
	速效磷	Ws	1.85±0.36Aa	1.17±0.26Aa	15.73±1.00Ab	10.55±1.75Ac
	AP (mg·kg ⁻¹)	Zg	0.88±0.20Ba	0.71±0.54Aa	131.66±52.62Bb	79.56±12.89Bb
	速效钾	Ws	101.01±8.23Aa	95.56±2.70Aab	106.04±10.55Aa	78.92±2.87Ab
	AK (mg·kg ⁻¹)	Zg	48.01±6.17Ba	30.81±4.24Bb	14.69±2.11Bc	21.35±1.1Bc
	有机质	Ws	32.31±5.20Aa	28.38±4.17Aab	27.91±3.11Aab	18.80±1.26Ab
	OM (g·kg ⁻¹)	Zg	14.48±1.30Ba	9.01±0.54Bb	14.52±2.03Ba	4.78±2.40Bb
	pH	Ws	7.46±0.10Aab	7.24±0.17Aa	7.61±0.07Abc	7.84±0.10Ac
Zg		5.01±0.12Ba	5.49±0.13Ba	6.25±0.21Bb	7.37±0.20Ac	
20~30	全氮	Ws	1.49±0.16Aa	1.30±0.14Aa	1.23±0.15Aa	0.72±0.14Ab
	TN (g·kg ⁻¹)	Zg	0.52±0.13Bab	0.30±0.07Bac	0.88±0.14Bb	0.09±0.08Bc
	全磷	Ws	0.30±0.02Aa	0.29±0.02Aa	0.36±0.03Aa	0.39±0.05Aa
	TP (g·kg ⁻¹)	Zg	0.11±0.02Ba	0.12±0.02Ba	2.62±0.27Bb	2.83±0.34Bb
	全钾	Ws	1.81±0.13Aa	1.81±0.05Aa	2.24±0.09Ab	2.29±0.13Ab
	TK (g·kg ⁻¹)	Zg	1.74±0.09Aa	1.78±0.18Aa	2.82±0.41Aa	2.81±0.41Aa
	速效氮	Ws	143.59±21.49Aa	70.87±15.57Abc	99.40±12.74Aab	35.36±3.08Ac
	AN (mg·kg ⁻¹)	Zg	106.76±11.61Aa	42.84±9.00Ab	16.10±4.08Bc	15.76±1.37Bc
	速效磷	Ws	1.97±0.36Aa	1.56±0.18Aa	13.70±1.13Ab	8.83±2.93Ab
	AP (mg·kg ⁻¹)	Zg	0.57±0.03Ba	0.54±0.10Ba	123.35±23.74Bb	78.01±12.73Bb
	速效钾	Ws	94.57±9.28Aa	91.21±2.51Aa	105.28±8.42Aa	90.79±11.08Aa
	AK (mg·kg ⁻¹)	Zg	43.10±7.58Ba	27.81±2.48Bb	18.06±3.18Bb	24.02±2.28Bb
	有机质	Ws	25.20±3.19Aa	22.11±2.89Aa	21.39±3.94Aa	17.77±1.21Aa
	OM (g·kg ⁻¹)	Zg	10.03±1.66Bab	8.06±1.76Bab	10.95±2.40Ba	4.50±1.85Bb
	pH	Ws	7.38±0.13Aab	7.08±0.14Aa	7.70±0.11Abc	7.81±0.07Ac
Zg		5.08±0.04Ba	5.54±0.13Bb	5.98±0.20Bc	7.40±0.08Bd	

Ws: 巫山 Wushan; Zg: 秭归 Zigui. 下同 The same below. 同行不同小写字母表示同一土层不同测定时间差异显著, 同列不同大写字母表示同一土层不同样地间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same row meant significant difference among years in the same soil layer, and different capital letters in the same column meant significant difference between plots in the same soil layer at 0.05 level.

表 2 不同样地土壤化学指标之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil chemical indicators in different plots

样地 Plots		pH	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	速效氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK
巫山	全氮 TN	-0.311 *						
Wushan	全磷 TP	0.499 **	0.027					
	全钾 TK	0.361 **	-0.232	0.492 **				
	速效氮 AN	-0.211	0.772 **	0.034	-0.280 *			
	速效磷 AP	0.361 **	-0.128	0.401 **	0.533 **	-0.283 *		
	速效钾 AK	-0.155	0.334 **	-0.039	-0.212	0.308 *	-0.042	
	有机质 OM	-0.226	0.781 **	0.210	-0.095	0.685 **	-0.136	0.474 **
	速效钾 AK	-0.155	0.334 **	-0.039	-0.212	0.308 *	-0.042	
秭归	全氮 TN	-0.397 **						
Zigui	全磷 TP	0.720 **	-0.237					
	全钾 TK	0.422 **	0.104	0.325 *				
	速效氮 AN	-0.634 **	0.501 **	-0.611 **	-0.290 *			
	速效磷 AP	0.410 **	-0.030	0.867 **	0.244	-0.517 **		
	速效钾 AK	-0.480 **	0.269 *	-0.509 **	-0.288 *	0.725 **	-0.487 **	
	有机质 OM	-0.369 **	0.783 **	-0.294 *	0.092	0.472 **	-0.147	0.357 **
	速效钾 AK	-0.480 **	0.269 *	-0.509 **	-0.288 *	0.725 **	-0.487 **	

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

位涨落后则变为秭归样地>巫山样地;经历水库水位涨落前和经历 1 次、4 次水库水位涨落后,0~10 cm 土层的 pH 值表现为巫山样地>秭归样地,但经历 7 次水库水位涨落后变为秭归样地>巫山样地.0~30 cm 各土层的 TN、AN、AK、OM 含量和其他土层的 AP 含量以及 pH 值始终表现为巫山样地>秭归样地.

经历水库水位涨落前,0~30 cm 各土层的 TK 含量,0~10 cm 土层的 TN、AP 和 OM 含量,0~10 cm 和 20~30 cm 土层的 AN 含量在样地间的差异不显著;经历 1 次水库水位涨落后,0~30 cm 各土层的 TK 含量,0~10 cm 和 20~30 cm 土层的 AN 含量,10~20 cm 的 AP 含量在样地间的差异不显著;经历 4 次水库水位涨落后,10~30 cm 各土层的 TK 含量在样地间的差异不显著;经历 7 次水库水位涨落后,只有 0~30 cm 各土层的 TK 含量以及 0~20 cm 各土层的 pH 值在样地间的差异不显著.其他土层各土壤化学指标在样地间的差异均达到显著水平.

2.2.2 在土层间的变化 从表 1 可以看出,巫山样地和秭归样地各土壤化学指标在土层间的垂直变化规律基本一致.在消落带经历水库水位涨落后的不同测定年份间,0~10 cm 土层的 TN、AN、AK 和 OM 含量始终高于其他土层,TP、TK 和 AP 含量以及 pH 值在各土层间的差别较小.

随着经历水库水位涨落次数的增多,土层间存在显著差异的土壤化学指标逐渐减少.经历 7 次水库水位涨落后,仅有巫山样地 0~10 cm 土层的 OM 含量和秭归样地 0~10 cm 土层的 AN 含量显著高于其他土层,其他各土壤化学指标在土层间的差异均

不显著.

2.3 消落带土壤化学指标间的相关性分析

从表 2 可以看出,巫山样地和秭归样地大多数土壤化学指标之间的相关性表现一致.其中,pH 与 TN、TP、AP、TK,TN 与 AK、AN、OM,TP 与 TK、AP,TK 与 AN,AN 与 AP、AK、OM,AK 与 OM 均为显著相关.

2.4 土壤 N、P、K、OM 含量的状态评价

按照全国第二次土壤普查养分分级标准^[18],对消落带经历水库水位涨落前后不同测定年份间土壤养分状态进行评价.表 3 显示,土壤养分等级的变化与大多数土壤化学指标含量随时间变化的规律一致,呈时高时低的波动性变化.在经历水库水位涨落后的不同测定年份间,始终处于低或很低养分等级的只有巫山样地的 TP 含量,以及巫山样地和秭归样地的 TK 含量;巫山样地的 AP 含量由经历水库水位涨落前的很低等级升高到经历 7 次水库水位涨落后的高等级,秭归样地的 TP 和 AP 含量由经历水库水位涨落前的很低等级升高到经历 7 次水库水位涨落后的极高等级;其他土壤指标大多经历从较高等级向较低等级的转变.

3 讨 论

3.1 水库水位周期性涨落对土壤 N、P、K、OM 含量和 pH 值的影响

三峡水库消落带每年有 5~6 个月(因高程而异)浸泡在水体中,6~7 个月出露成陆地.消落带土壤在淹没时,会受到水库水位涨落的重力侵蚀和涌浪冲刷的影响,在出露成陆期还会受到地表径流和

表 3 不同年份 0~30 cm 土层土壤化学指标含量评价
Table 3 Evaluation of soil chemical indicators in 0~30 cm soil layer in different years

指标 Indicator	年份 Year	平均含量 Average content		评价 Evaluation	
		Ws	Zg	Ws	Zg
全氮 (g·kg ⁻¹)	2008	1.75±0.14	0.83±0.13	II	IV
	2009	1.56±0.11	0.60±0.12	II	V
	2012	1.37±0.09	0.94±0.08	III	IV
	2015	0.77±0.08	0.20±0.07	IV	VI
全磷 (g·kg ⁻¹)	2008	0.33±0.01	0.12±0.01	V	VI
	2009	0.31±0.01	0.11±0.01	V	VI
	2012	0.36±0.02	2.75±0.41	V	I
	2015	0.39±0.02	2.96±0.21	V	I
全钾 (g·kg ⁻¹)	2008	1.78±0.07	1.73±0.18	VI	VI
	2009	1.78±0.05	1.70±0.09	VI	VI
	2012	2.18±0.07	3.49±0.44	VI	VI
	2015	2.38±0.14	2.84±0.16	VI	VI
速效氮 (mg·kg ⁻¹)	2008	182.48±17.65	114.32±10.35	I	III
	2009	90.0±09.10	57.07±7.44	III	V
	2012	110.88±7.03	25.34±3.32	III	VI
	2015	40.86±2.37	22.90±2.12	V	VI
速效磷 (mg·kg ⁻¹)	2008	1.88±0.17	1.31±0.32	VI	VI
	2009	1.32±0.13	1.12±0.20	VI	VI
	2012	12.38±1.42	123.40±22.35	III	I
	2015	10.09±1.39	73.93±6.33	III	I
速效钾 (mg·kg ⁻¹)	2008	105.03±5.55	55.22±5.74	III	IV
	2009	97.17±2.38	33.07±3.03	IV	V
	2012	111.10±5.15	17.37±1.37	III	VI
	2015	85.59±4.13	24.24±1.26	IV	VI
有机质 (g·kg ⁻¹)	2008	33.26±3.08	16.20±1.73	II	IV
	2009	29.87±2.59	12.43±1.61	III	IV
	2012	29.12±2.23	16.25±2.25	III	IV
	2015	19.80±0.91	6.73±1.53	IV	V

I: 极高 Extremely high; II: 很高 Very high; III: 高 High; IV: 中 Middle; V: 低 Low; VI: 很低 Very low.

雨水淋溶的影响。水库水位周期性涨落一方面会加速消落带土壤对营养物质的机械吸收、物理吸收、化学吸收和生物吸收,另一方面也会促进土壤养分的释放、溶解和扩散^[19]。峡谷地貌区为三峡水库的一个特殊区域,其消落带土壤 N、P、K、OM 含量和 pH 值的变化还受区域的水文特征、植被变化、人为干扰活动,以及不同土壤化学元素性质的综合影响。

土壤中的 N 主要来源于动植物残体和生物固氮,少量来自大气降水^[20]。有机氮是土壤 N 的重要组成部分,而无机氮(铵态氮和硝态氮)的比例较小^[21]。土壤 OM 是土壤中细小的非生命体形式的天然有机物的总称,包括了未改变的和部分改变的动植物残体,更主要的是腐烂分解的有机物或其再合成的产物^[22]。土壤 N 的积累和消耗程度主要取决于土壤 OM 的积累和分解,土壤 OM 含量的变化取决于有机物质输入量和输出量的大小。其中,输入量主

要依赖于有机残体归还量的多少及有机残体的腐殖化系数,输出量主要包括分解量和侵蚀损失量,受各种生物和非生物条件控制^[10-11,20,23]。在水库水位周期性涨落影响下,最显而易见的是消落带植被的变化。因消落带原生植被大多数植物缺乏适应水陆交替变化生境的组织结构和功能,在经历水库水位涨落后开始陆续死亡,而新生植被又难以在短期内充分发育^[15]。植被的破坏等于切断了土壤 OM 输入的主要渠道;而缺乏植被保护的土壤,其抵御水库水位涨落和涌浪冲刷的能力必然下降。这些因素的变化可能是消落带土壤 N 和 OM 含量大量流失的主要原因^[16,24-27]。峡谷地貌区消落带由于坡度大,土壤受水位涨落和涌浪冲刷的影响较其他区域更为严重,受损植被自然恢复的时间会相对较长。这与本研究中土壤 TN、AN 与 OM 含量随着消落带经历水库水位涨落次数的增多而减少的变化规律相对应(表 1),并与重庆市忠县石宝寨消落带^[9]以及秭归段和巫山段消落带形成初期^[12]土壤 TN、AN 与 OM 含量变化的研究结果一致。

在自然状态下,土壤中 P 主要源于成土母质和动植物残体的归还,P 含量的多少取决于母质类型、风化和淋失程度^[20]。土壤或沉积物中 P 在酸性条件下释放量大于中性或碱性条件下的释放量,而 P 的吸附或固持却与此相反^[28-29]。定量分析也表明,土壤 P 含量与土壤 pH 值密切相关(表 2)。三峡水库消落带是人类影响最大的地区,也是库区泥沙、有机物、农药和化肥进入水库的最后一道屏障。库区周边农业活动中大量化肥和农药的使用^[30-33],以及磷矿开采和工厂废水的排放^[29,32,34],可能是土壤 P 含量大幅度增加的主要原因。马利民等^[35]研究发现,土壤添加外源磷后,土壤 AP 水平会增大;朱强等^[36]研究表明,消落带土壤中施加 K、Ca 或尿素时,土壤中 AP 含量可能增加,并影响库区的含 P 量。其原因在于用作肥料的磷酸盐与土壤中 Ca、Fe、NH₄⁺ 离子发生作用后,会变成不溶性的盐固结在消落带土壤或水体的沉积物中;而且流经消落带土壤的 P 在库区蓄水-落干周期性转换过程中,也会向水体中释放。本研究中,位于库首的秭归段消落带土壤中的 TP 和 AP 含量在经历水库水位涨落前(2008 年)和经历 1 次水库水位涨落后(2009 年)处于很低的养分等级,但在经历 4 次水库水位涨落后(2012 年)升至极高等级,经历 7 次水库水位涨落后(2015 年)与经历 4 次水库水位涨落后的结果相同;巫山段消落带土壤 AP 含量也由过去很低养分等级升至了高等

级(表3).该研究结果与Wu等^[37]对三峡水库消落带沉积物和Han等^[38]在三峡水库上游水体的研究结论相吻合,但与沈雅飞等^[14]在秭归段得出的土壤TP和AP含量随着消落带经历水位涨落周年的增加而减少的结论不同.

土壤中的K基本上都源自土壤母质中的含K矿物,其含量与成土母质类型有关,同时也受人施肥的影响^[39].土壤TK包括矿物性K、缓效性K和速效性K.矿物性K主要存在于土壤粗粒部分,约占TK的90%;缓效性K存在于层状硅酸盐矿物层和颗粒的边缘,属不能被中性盐在短时间内浸提出的K,约占TK的2%~8%;其余少部分为土壤速效性K.土壤有机质(腐殖质)与粘粒组成的有机-无机胶体是交换性阳离子(含K)的基本载体,具有突出的保K作用^[40].本研究中,随着消落带经历水库水位涨落次数的增多,AK含量减少,其变化规律与土壤OM含量的变化基本一致(表1).定量分析表明,OM含量与AK含量存在显著正相关(表2).但与土壤中N和ON含量相比,AK含量的减少幅度明显偏小.其原因可能与3种形态K的转化机制有关.有研究表明,干湿交替可加剧岩石分化,使K得以释放^[14].当土壤中K因淋溶损失或被作物吸收后,吸附在土壤表面的K会向土壤溶液中转移;当土壤溶液中K的浓度提高后,它又会向固相表面转移,以保持一种动态平衡^[40].因此,在经历多次水库水位涨落过程中,土壤K含量的变化相对较小.

土壤酸碱度是土壤最重要的化学性质.它与土壤微生物的活动,各类营养元素的合成和分解、转化和释放及有效性,以及土壤保持养分的能力有关^[20].张金祥等^[41]对三峡水库消落区淹水后土壤性质的模拟试验表明,经过淹水,酸性土壤pH升高,碱性土壤pH降低,最终都将趋近于中性.在本研究中,秭归样地的土壤在消落带经历水库水位涨落前呈酸性,随着经历水库水位涨落次数的增多,pH值升高,趋于碱性;巫山样地的土壤在消落带经历水库水位涨落前呈微碱性,但经历多次水库水位涨落后,在原来的基础上缓慢上升(表1).常超等^[9]和储立民等^[42]在对三峡水库其他区域消落带土壤pH的研究中也有类似发现,并提出是因为在嫌气强烈还原条件下,土壤内形成大量的碱性还原性碳酸铁锰,溶解度较大所导致.消落带经历若干年水库水位涨落后是否会趋于中性,还有待继续监测.

3.2 土壤N、P、K、OM含量和pH值空间变化特征

三峡水库的水体是流动的.不同区段水体的流

速存在一定的差异.越接近库首水面越宽阔,水体流速相对减缓,从而为上游水体悬浮颗粒物吸附的营养元素,以及吸附营养元素的固体颗粒(泥沙等)在库首消落带土壤中富集提供了有利条件^[32,37,43].这些可能是本研究中消落带在经历水库水位涨落前和经历1次水库水位涨落后(2009年),大多数土层的TP、TK和AP含量表现为巫山样地>秭归样地,但在经历4次(2012年)和7次水库水位涨落后,各土层的TP、TK和AP含量变为秭归样地>巫山样地的主要原因.但对其迁移机理(如水力扰动、水土界面上磷迁移规律等)还有待深入探讨.

一般认为,土壤营养元素会在土壤表层富集^[10,12,14,20].其原因可能与植被凋落物、死地被物、根系残体、土壤中的小动物和微生物等主要集聚在土壤上层有关^[20,23].本研究中,经历水库水位涨落前和经历1次、4次水库水涨落后,有一些土壤化学指标在0~10 cm土层中的含量比10~20或20~30 cm土层高,且差异显著,与上述理论相符.但经历7次水库水位涨落后,仅有极个别指标存在这种现象,大多数指标含量在土层间的差异不显著.这说明随着消落带经历水库水位涨落次数的增多,土壤营养元素含量在土层间的差异缩小.这可能与经历多次水库水位涨落后富含有机质的疏松表层土壤不断丧失有关.

参考文献

- [1] New T, Xie ZQ. Impacts of large dams on riparian vegetation: Applying global experience to the case of China's Three Gorges Dam. *Biodiversity Conservation*, 2008, **17**: 3149-3163
- [2] Strayer DL, Findlay SEG. Ecology of freshwater shore zones. *Aquatic Sciences*, 2010, **72**: 127-163
- [3] Fu BJ, Wu BF, Lü YH, et al. Three Gorges Project: Efforts and challenges for the environment. *Progress in Physical Geography*, 2010, **34**: 741-754
- [4] Bao YH, Gao P, He XB. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 2015, **150**: 14-24
- [5] Baldwin DS, Mitchell AM. The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: A synthesis. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2000, **16**: 457-467
- [6] Su W-C (苏维词). Main ecological and environmental problems of water-level-fluctuation zone (WLFZ) in Three Gorges Reservoir and their controlling measures. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* (长江科学院院报), 2004, **21**(2): 32-34 (in Chinese)
- [7] Zhou Y-J (周永娟), Qiu J-X (仇江啸), Wang J (王姣), et al. Assessment of eco-environmental vulnerabi-

- lity of water-level fluctuation belt in Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(24): 6726–6733 (in Chinese)
- [8] Cheng H (程辉), Wu S-J (吴胜军), Wang X-X (王小晓), *et al.* Research progress on the effects of the Three Gorges Reservoir on the ecological environment. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2015, **23**(2): 127–140 (in Chinese)
- [9] Chang C (常超), Xie Z-Q (谢宗强), Xiong G-M (熊高明), *et al.* The effect of flooding on soil physical and chemical properties of riparian zone in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2011, **26**(7): 1236–1244 (in Chinese)
- [10] Wang X-R (王晓荣), Cheng R-M (程瑞梅), Xiao W-F (肖文发), *et al.* Soil nutrient characteristics in juvenile water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2010, **29**(2): 281–289 (in Chinese)
- [11] Guo J-S (郭劲松), Huang X-M (黄轩民), Zhang B (张彬), *et al.* Distribution characteristics of organic matter and total nitrogen in the soils of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), 2012, **24**(2): 213–219 (in Chinese)
- [12] Guo Q-S (郭泉水), Kang Y (康义), Zhao Y-J (赵玉娟), *et al.* 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* (林业科学), 2012, **48**(3): 7–10 (in Chinese)
- [13] Li C-X (李楚娴), Zhang J-Y (张金洋), Wang D-Y (王定勇), *et al.* Dynamic variations of nitrogen and phosphorus of the soil in hydro-fluctuation of Three Gorges Reservoir. *Environmental Chemistry* (环境化学), 2014, **33**(12): 2169–2175 (in Chinese)
- [14] Shen Y-F (沈雅飞), Wang N (王娜), Liu Z-B (刘泽彬), *et al.* Changes of the soil chemical properties in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2016, **30**(3): 190–195 (in Chinese)
- [15] Zhu N-N (朱妮妮), Guo Q-S (郭泉水), Qin A-L (秦爱丽), *et al.* 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* (生态学报), 2015, **35**(23): 7852–7867 (in Chinese)
- [16] Li Y-C (李月臣), Yang Y (杨扬), He Z-M (何志明), *et al.* The summary of existing wetland research on the Three Gorges Reservoir. *Journal of Chongqing Normal University* (Natural Science) (重庆师范大学学报: 自然科学版), 2013, **30**(4): 25–33 (in Chinese)
- [17] The State Forestry Administration (国家林业局). Forestry Industry Standard of the People's Republic of China: Forest Soil Analysis Method. Beijing: China Standards Press, 1999 (in Chinese)
- [18] Office of National Soil Survey (国家土壤调查办公室). Provisional Technical Regulations for the Second Soil Census in China. Beijing: China Agriculture Press, 1979 (in Chinese)
- [19] Fan X-H (范小华), Xie D-T (谢德体), Wei C-F (魏朝富). Study on the ecological environmental problems of the riparian zone under interactions of the soil and water. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2006, **22**(10): 374–379 (in Chinese)
- [20] Bai J-H (白军红), Deng W (邓伟), Zhang Y-X (张玉霞), *et al.* Spatial distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen in the natural floodplain wetland. *Environmental Science* (环境科学), 2002, **23**(2): 77–81 (in Chinese)
- [21] Wang C (王纯), Wang W-Q (王维奇), Zeng C-S (曾从盛), *et al.* Soil nitrogen forms concentration and storage along saline-fresh water of Minjiang River Estuarine Wetland. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2011, **25**(5): 147–153 (in Chinese)
- [22] Dou S (窦森). Soil Organic Matter. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [23] Xiao Y (肖焯), Huang Z-G (黄志刚), Wu H-T (武海涛), *et al.* Carbon and nitrogen distributions and microbial characteristics in the soils of four types of wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(10): 2847–2854 (in Chinese)
- [24] Qiu S, McComb AJ. Drying-induced stimulation of ammonium release and nitrification in reflooded lake sediment. *Marine and Freshwater Research*, 1996, **47**: 531–536
- [25] Pérez JMS, Trémolières M, Takater N, *et al.* Quantification of nitrate removal by a flooded alluvial zone in the III floodplain (Eastern France). *Hydrobiologia*, 1999, **410**: 185–193
- [26] Zheng BH, Zhao YY, Qin YW, *et al.* Input characteristics and sources identification of nitrogen in the three main tributaries of the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Earth Science*, 2016, **75**: 1219–1229
- [27] Yang D (杨丹), Fan D-Y (樊大勇), Xie Z-Q (谢宗强), *et al.* Research progress on the mechanisms and influence factors of nitrogen retention and transformation in riparian ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(3): 973–980 (in Chinese)
- [28] Wang Y (王颖), Shen Z-Y (沈珍瑶), Hu L-J (呼丽娟), *et al.* Adsorption and release of phosphorus from sediments from the main branches of the Three-Gorges Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2008, **28**(8): 1654–1661 (in Chinese)
- [29] Jiang LG, Liang B, Xue Q, *et al.* Characterization of phosphorus leaching from phosphate waste rock in the Xiangxi River watershed, Three Gorges Reservoir, China. *Chemosphere*, 2016, **150**: 130–138
- [30] Yao QZ, Yu ZG, Chen HT, *et al.* Phosphorus transport and speciation in the Changjiang (Yangtze River) system. *Applied Geochemistry*, 2009, **24**: 2186–2194

- [31] He L-P (何立平), Fu C (付川), Xie K (谢昆), *et al.* Soil phosphorus species and storage characteristics of different types in water fluctuation zone of the Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2014, **23**(4): 534–541 (in Chinese)
- [32] Gao Q, Li Y, Cheng QY, *et al.* Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013. *Water Research*, 2016, **92**: 262–274
- [33] Ma X, Li Y, Li BL, *et al.* Nitrogen and phosphorus losses by runoff erosion: Field data monitored under natural rainfall in Three Gorges Reservoir Area China. *Catena*, 2016, **147**: 797–808
- [34] Li F-Q (李凤清), Ye L (叶麟), Liu R-Q (刘瑞秋), *et al.* Dynamics of the main nutrients input to Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(5): 2073–2079 (in Chinese)
- [35] Ma L-M (马利民), Zhang M (张明), Liu C (刘丛), *et al.* The effect of anthropogenic phosphorus on the characteristics of soil and its phosphorus release in the water-fluctuation-zone. *Environmental Chemistry* (环境化学), 2008, **27**(1): 73–76 (in Chinese)
- [36] Zhu Q (朱强), An R (安然), Hu H-Q (胡红青), *et al.* Adsorption and transformation of phosphorus in soils of the tidal zone of the Three Gorges Reservoir Region. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2012, **49**(6): 1128–1135 (in Chinese)
- [37] Wu YH, Wang XX, Zhou J, *et al.* The fate of phosphorus in sediments after the full operation of the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 282–289
- [38] Han CN, Zheng BH, Qin YW, *et al.* Analysis of phosphorus import characteristics of the upstream input rivers of Three Gorges Reservoir. *Environmental Earth Science*, 2016, **75**: 1024–1034
- [39] Jiang W-W (蒋文伟), Zhou G-M (周国模), Yu S-Q (余树全), *et al.* Research on nutrient status of soils under main forest types in Anji Mountainous Region. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(4): 73–76 (in Chinese)
- [40] Xu X-Y (徐晓燕), Ma Y-J (马毅杰), Zhang R-P (张瑞平). Research progress in transformation of soil potassium in relation to potash application. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2003, **34**(5): 489–492 (in Chinese)
- [41] Zhang J-Y (张金洋), Wang D-Y (王定勇), Shi X-H (石孝洪). Change of soil character after flooding in drawdown area of Three Gorges Reservoir. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(6): 120–123 (in Chinese)
- [42] Chu L-M (储立民), Chang C (常超), Xie Z-Q (谢宗强), *et al.* Effect of impounding of the Three-Gorges Reservoir on soil heavy metals in its hydro-fluctuation belt. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2011, **48**(1): 192–196 (in Chinese)
- [43] Ran XB, Chen HT, Wei JF, *et al.* Phosphorus speciation, transformation and retention in the Three Gorges Reservoir, China. *Marine and Freshwater Research*, 2016, **67**: 173–186

作者简介 简尊吉, 男, 1991年生, 硕士研究生. 主要从事森林生态学研究. E-mail: jianzunji2014@163.com

责任编辑 孙菊

简尊吉, 裴顺祥, 郭泉水, 等. 三峡水库峡谷地貌区消落带土壤氮磷钾、有机质含量和 pH 值的时空动态. *应用生态学报*, 2017, **28**(9): 2778–2786

Jian Z-J, Pei S-X, Guo Q-S, *et al.* Temporal and spatial dynamics of soil nitrogen, phosphorus, potassium, organic matter and pH in the water level fluctuation zone of canyon landform area of the Three Gorges Reservoir, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(9): 2778–2786 (in Chinese)