

不同植被恢复模式下三峡库区万州段消落带土壤养分及其空间分布特征

王娅傲^{1,2}, 陈芳清^{1,2*}, 张 森¹, 吴 阳², 陈韶华²

(1.三峡地区生态保护与治理国际合作研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学三峡库区生态与环境教育部工程研究中心, 湖北宜昌 443002)

摘要: 消落带植被状况与水位消涨是影响土壤养分及其分布的重要因子。本文以三峡库区万州段消落带为研究地点,通过对人工和自然恢复样地沿海拔梯度对土壤进行取样和分析,揭示了不同恢复模式下消落带土壤养分及其空间分布特征。研究表明,植被恢复模式对土壤养分有显著影响,人工恢复样地消落带主要土壤养分含量总体高于自然恢复样地,显示人工恢复能有效促进土壤养分在植物群落中的积累;在库区反季节水位消涨的作用下,人工恢复地消落带土壤养分沿海拔梯度呈先增加后减少的空间分布格局,土壤养分含量在消落带中部(海拔 165 m)达到最高值,而自然恢复地土壤有机质和全氮的空间分布则随海拔梯度增加而增加,以消落带上部(海拔 175 m)的值最高。土壤养分的空间分布格局源自于不同海拔梯度的消落带受水位消涨扰动程度以及植被恢复状况的差异,植被恢复模式对土壤养分的空间分布仍有一定影响。今后应在消落带上部进一步引种适宜的乔灌木物种,不断提高消落带植被对土壤养分的固持能力。

关键词: 消落带;土壤养分;恢复模式;三峡库区

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2016)02-0127-07

doi: 10.13254/j.jare.2015.0275

引用格式:

王娅傲, 陈芳清, 张 森, 等. 不同植被恢复模式下三峡库区万州段消落带土壤养分及其空间分布特征[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 127-133.

WANG Ya-jing, CHEN Fang-qing, ZHANG Miao, et al, Characteristics of Soil Nutrient and Spatial Distribution on Riparian Zone Restored by Different Vegetation Restoration Methods at Wanzhou Section in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 127-133.

Characteristics of Soil Nutrient and Spatial Distribution on Riparian Zone Restored by Different Vegetation Restoration Methods at Wanzhou Section in the Three Gorges Reservoir Area, China

WANG Ya-jing^{1,2}, CHEN Fang-qing^{1,2*}, ZHANG Miao¹, WU Yang², CHEN Shao-hua²

(1. International Research Center for Ecological Protection and Management in the Three Gorges Area, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of the Ministry of Education for the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Riparian vegetation and water-level fluctuation are critical factors influencing soil nutrients and their spatial distribution. Taking Wanzhou section as a case study, the characteristics of soil nutrient and spatial distribution in riparian vegetation restored by different methods in the Three Gorges Reservoir area were uncovered by field investigation and chemical analysis of soil samples collected from the artificial and natural restoration plots, respectively. Results showed that restoration method had significant effect on soil nutrients. The content of soil nutrients in the artificial restoration plot was generally higher than that in the natural recovery plot indicating that artificial restoration promoted accumulation of soil nutrients in vegetation. Under the influence of the reverse seasonal water-level fluctuation, a special spatial distribution pattern that the riparian soil nutrients increased and then decreased with the increasing latitude appeared on the artificial restoration plot. The maximum content of soil nutrients occurred at the middle riparian part (altitude 165 m). However, soil organic matter and

收稿日期: 2015-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目“反季节消涨节律扰动下土壤种子库对消落带植被生态恢复的作用机制”(51379105)

作者简介: 王娅傲(1990—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为恢复生态学。E-mail: 373987776@qq.com

* 通信作者: 陈芳清 E-mail: fqchen@ctgu.edu.cn

total nitrogen increased with the increasing of altitude gradient on the natural restoration plot, and reached the maximum at the upper riparian part (altitude 175 m). The spatial distribution pattern of soil nutrients resulted from the differentiation of water-level fluctuation disturbance and vegetation among altitude gradients. Restoration methods also affected the spatial distribution of soil nutrients as it influenced vegetation restoration. Appropriate tree and shrub species adapting to the disturbance of the reverse seasonal water-level fluctuation should be further introduced to the upper riparian part to promote the vegetation capacity of holding soil nutrients.

Keywords: water-level fluctuation zone; soil nutrient; restoration method; Three Gorges Reservoir area

湿地植被通过吸收、转化和固定土壤营养物质,能达到涵养水土、净化水质的生态功效^[1]。三峡成库后形成了大面积的消落带,库区反季节、大幅度的水位涨落及其所带来的水淹与干旱胁迫使得消落带植被组成与结构急剧退化^[2],群落类型由以前的灌草转变成草丛,群落的物种多样性显著下降,物种组成以一年生草本植物为主^[3]。植物群落的退化严重影响上述生态功能^[4],恢复与重建消落带植被对于减少土壤养分流失、稳固岸坡、改善库区的生态环境具有积极意义。植被恢复按照人工参与的程度分为人工恢复、自然恢复和半人工恢复 3 种模式^[5]。不同恢复模式下植被的恢复进程不一致,所形成植被组成、结构和空间分布都会有所差异^[6],进而影响到土壤养分的流动以及不同土地单元营养成分的滞留和转化^[7],最终影响到土壤营养成分含量^[8]。消落带土壤养分及其空间分布还可能受到水位消涨的影响^[9]。一方面水位在洪泛季节的消涨会增加土壤的养分沉积,而在清水季节水位涨落造成的重力侵蚀和水浪频繁冲刷都会增加土壤养分的淋失^[10];其次水位消涨会引起植被组成与结构的变化,并由此影响到土壤养分的积累^[11]。此外,消落带出露成陆期土壤养分还会受到季节性干旱气候和雨水的影响^[12]。

三峡工程修建后,人们围绕消落带植被的生态恢复开展了物种筛选、植被构建技术的系列研究,取得了初步的成效^[13]。一些研究显示消落带土壤养分在水位消涨的影响下呈明显的空间分布^[10,12]。但是关于恢复模式对库区消落带土壤养分及其空间分布的影响则缺少相关报道。本文以三峡库区万州段谭绍村消落带的人工恢复试验地和自然恢复为研究对象,通过对土壤养分的取样分析,拟揭示不同恢复模式下土壤养分及其空间变化情况,客观评价现有植被恢复的生态效应,为后期植被恢复的深入开展提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于长江三峡库区万州境内的谭绍村。

研究地属于亚热带季风气候,具有雨热同季、热量丰富、雨量充沛的气候特点。年均温 18.2℃,年降雨量 1 067 mm,相对湿度 79%~82%。样地坡度 20°左右,土壤类型为黄色石灰土,土层厚度 35 cm 左右。人工恢复于 2007 年进行,恢复地面积为 15 000 m²。其中海拔 160 m 以下种植了狗牙根(*Cynodon dactylon*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、虎杖(*Polygonum cuspidatum*)等草本植物;海拔 160~170 m 种植了狗尾草、三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)等草本植物;海拔 170~175 m 分别配置了桑树(*Morus alba*)、柳树(*Salix babylonica*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)和槐树(*Sophora japonica*)等乔木,以及盐肤木(*Rhus chinensis*)、花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)、黄荆(*Vitex negundo*)等灌木和狗牙根、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、青蒿(*Artemisia carvifolia*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)草本植物。经过多个水位消涨循环后,海拔 170~175 m 处消落带,所栽种乔木和灌木种类存活较少,目前仅存少量柳树;海拔 145~170 m 范围内形成了狗尾草和狗牙根为优势种的草丛;海拔 170~175 m 范围则形成了以水蓼、狗牙根为优势种的草丛。自然恢复地避免人工干扰,保持自然恢复状态,目前在海拔 145~170 m 范围内形成了空心莲子草和狗牙根为优势种的草丛,在 170~175 m 范围内形成了以大狼把草和狗牙根为优势种的草丛,其上缘有构树、柳树、野花椒和乌桕(*Sapium sebiferum*)等乔灌木植物的分布。

1.2 样方设置与取样

在实验所在地按消落带恢复模式分别设置人工植被恢复(30°43′24.33″N, 108°25′43.47″E)和自然植被恢复(30°43′24.41″N, 108°25′43.36″E)试验样地。2014 年在库区消落带水位消退之后,在实验样地消落带内沿海拔梯度分别在 150、155、160、165、170 m 和 175 m 处每隔 5 m 设置 1 个样带,共 6 个样带。在各样带中每隔 5 m 设置 1 个 1 m×1 m 的样方,每一样带设置 5 个样方并进行标记,在各样方内选取 4 个角及中心点共 5 个样点,清除表层植被,用土壤采集器(直径 8 cm、高 15 cm)采集土样,把 5 个小样点的土

壤用自封袋分别分装,即每个海拔有25个实验样品,2个样地共采集300份土壤样品。将采集的土样带回实验室自然风干研磨过筛后进行化学分析和测定。

1.3 土壤养分与酸碱性的测定

将所采集的土壤样品进行了pH值、有机质、全氮、全磷和全钾含量的测定。其中土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定;全钾采用NaOH熔融,火焰光度法测定;pH值采用pH酸度计法测定。

1.4 数据处理与分析

以恢复模式和海拔梯度为变量,以土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量以及pH值为因变量,进行多因素方差分析,以揭示恢复模式和反映水位消涨节律的海拔梯度对土壤养分及其分布的作用。当某因素影响水平达到显著性时,再采用多重比较(Turkey)法分析各处理之间的差异性。上述分析所使用的软件为SPSS(19.0)。

2 结果与分析

2.1 恢复模式与海拔梯度对土壤养分作用的总体分析

多因素方差分析表明,实验因子植被恢复模式和海拔梯度,以及两实验因子相互之间对土壤有机质、全氮、全磷和全钾等含量都有显著性作用(表1),但

是对土壤pH值影响不显著。表明消落带土壤养分一方面本身因不同海拔梯度所存在的环境异质性而变化,另一方面又因不同恢复模式下植被恢复进程的差异而变化。

2.2 植被恢复模式对土壤养分的作用

植被恢复模式对消落带土壤养分含量有着显著影响(表2),人工恢复地主要土壤养分含量均比自然恢复地高,其中有机质、全氮、全磷和全钾含量分别比自然恢复样地高43.52%、43.83%、28.39%、25.52%,而pH值无显著差异。总体上,消落带人工恢复模式比自然恢复模式能更有效地促进消落带土壤养分的稳固与积累。

2.3 海拔梯度对样地消落带土壤养分的影响

受水位涨落节律的影响,不同海拔梯度消落带出露和淹没的时间与季节有着明显的不同,消落带各海拔梯度土壤养分的含量因此而存在显著差异(表3)。土壤养分均随海拔增加呈先增加后减少的变化趋势,在海拔165m处达到最高。其中土壤有机质和全氮含量分别在10.32~13.56、0.69~0.87 g·kg⁻¹之间变化,平均值分别为12.14、0.81 g·kg⁻¹,不同海拔之间最大值与最小值之间的差异分别为31.39%和26.09%。而土壤全磷、全钾含量平均值为0.88、9.16 g·kg⁻¹,不同海拔之间最大值比最小值分别高35.26%和30.32%;土

表1 恢复模式与海拔梯度对土壤养分及pH值作用的总体方差分析

Table 1 The effects of restoration methods and the elevation gradient on soil nutrients and pH value

实验因素 Experimental factors	有机质 Organic matter			全氮 Total nitrogen			全磷 Total Phosphorus			全钾 Total potassium			pH		
	df	MS	Sig	df	MS	Sig	df	MS	Sig	df	MS	Sig	df	MS	Sig
恢复模式 Restoration method	1	7.97	0.00	1	1.25	0.00	1	1.84	0.03	1	6.25	0.04	1	0.47	0.76
海拔梯度 Altitude gradient	5	43.01	0.00	5	2.14	0.00	5	2.92	0.00	5	8.21	0.00	5	0.63	0.14
恢复模式×海拔梯度 Restoration method×Altitude gradient	11	8.85	0.00	11	1.36	0.00	11	1.97	0.00	11	7.01	0.00	11	0.33	0.13

注:“df”表示自由度,“MS”表示均方差,“Sig”表示显著性。

Note: df indicates freedom degrees, MS indicates Standard deviation, Sig indicates significance.

表2 恢复模式对消落带土壤养分及pH值的影响

Table 2 The effects of restoration methods on riparian soil nutrients and pH value

恢复模式 Restoration method	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/g·kg ⁻¹	全钾 Total potassium/g·kg ⁻¹	pH
人工恢复样地 Artificial restoration	15.86±0.25a	1.05±0.04a	1.04±0.03a	10.92±0.21a	7.34±0.01a
自然恢复样地 Natural restoration	11.05±0.43b	0.73±0.02b	0.81±0.01b	8.7±0.14b	7.11 ±0.04a

注:表中数据为平均值±标准误,同列不同字母表示差异显著水平(P<0.05)。下同。

Note: Data is Mean±SE, different letters indicate significant levels among treatments(P<0.05). The same below.

壤 pH 值在不同海拔间的差异不显著。

2.4 恢复模式和海拔梯度对土壤的综合效应

消落带土壤营养含量受植被恢复模式和海拔梯度的双重影响(图 1)。在水位消涨的影响下,各土壤养分都随着海拔梯度的增加呈先增加后减少的变化趋势。但是,受恢复模式的影响,土壤有机质和全氮的含量在自然恢复模式中均以消落带上部的最高,中部的次之,下部的最低,而在人工恢复模式下却呈先增

加后减少的趋势。其中人工恢复消落带中部的土壤有机质和全氮的含量比消落带上部的高 37.06% 和 49.39%,而自然恢复消落带中部的土壤有机质和全氮的含量比消落带上部的分别低 8.07% 和 5.06%;土壤全磷和全钾的含量的空间分布格局在 2 种恢复模式之间的差距不大,都是呈中间高、上下部低的特征。但人工恢复样地中土壤全磷和全钾在各海拔间的含量均高于自然恢复地。

表 3 消落带土壤养分及 pH 值在不同海拔梯度的分布
Table 3 The distribution of soil nutrients and pH along riparian altitude gradient

海拔/m Altitude gradient	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/g·kg ⁻¹	全钾 Total potassium/g·kg ⁻¹	pH
150	10.32±0.78c	0.69±0.04c	0.68±0.06c	7.65±0.44c	7.61±0.04a
155	11.48±0.78b	0.74±0.04bc	0.79±0.06bc	8.41±0.44bc	7.53±0.06a
160	12.64±0.75ab	0.84±0.03ab	0.96±0.07ab	9.33±0.49ab	7.42±0.05a
165	13.56±0.78a	0.87±0.02a	1.05±0.09a	10.98±0.33a	7.04±0.06a
170	12.89±0.89a	0.85±0.03a	0.98±0.06a	9.87±0.19a	6.91±0.04a
175	11.97±0.39b	0.83±0.02b	0.83±0.05b	8.76±0.34b	6.89±0.04a

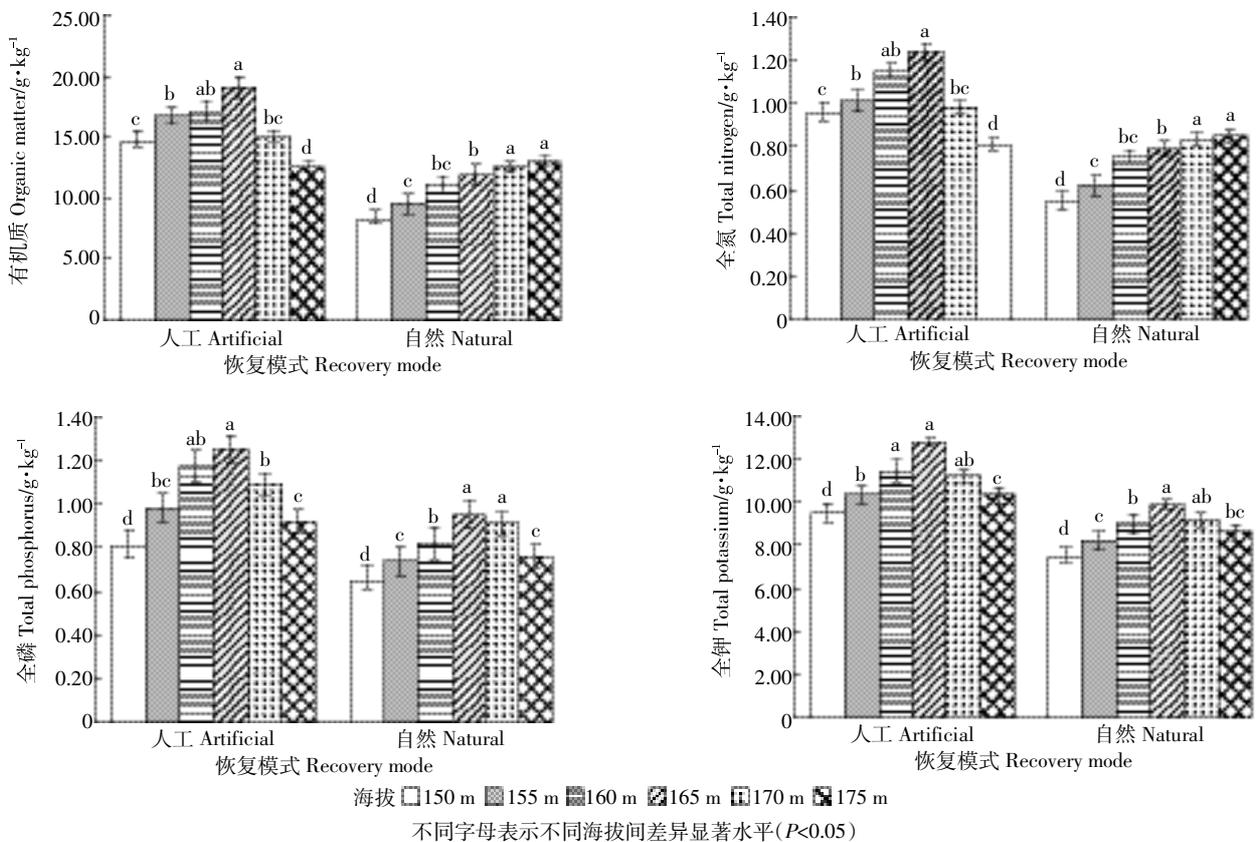


图 1 不同恢复模式与海拔梯度消落带土壤营养的空间分布

Figure 1 Spatial distribution of soil nutrients along altitude gradient in the riparian banks restored by different restoration methods

3 讨论

3.1 恢复模式对消落带土壤养分的影响

湿地植被恢复能有效促进土壤养分的保持与积累^[14],土壤养分状况常因植物群落类型及其生长状况的不同而显著变化^[15]。不同恢复模式下湿地植被的恢复进程和植被恢复状况有较大差异。一般情况下人工恢复的进程快,植物生长状况较好,但多样性往往较低。而自然恢复的进程相对较慢,植物生长状况相对较差,多样性相对较高。因此不同恢复模式下植被的土壤养分状况常存在一定差异^[16]。钟芳等^[9]研究了2种不同植被恢复模式(自然恢复、人工重建+自然恢复)土壤的养分状况,并与天然植被进行比较,发现3种植被类型的土壤pH值差异不显著,土壤有机质、全氮、全磷含量均以天然植被恢复样地最高,其次为人工重建+自然恢复样地,而自然恢复样地最低。

由于群落生物量对氮素的滞留能力有一定的影响,并且植物能向土壤返还氮素,同时植物根系对氮有强大的吸收能力^[17],因此,植物群落及其生长状况对土壤的有机质和全氮含量的影响较为显著^[18];而土壤中全磷、全钾含量主要受土壤母质及动植物残体的影响,因此其对植物群落及其生长状况影响程度相对低一些^[19]。本研究中,植被恢复模式对土壤的有机质和全氮有极显著影响,对全磷、全钾有显著影响,而对pH值的影响不显著。人工恢复模式下几种主要土壤养分均高于自然恢复样地,表明人工恢复植被总体上比自然恢复的植被更有利于土壤养分的积累与固持。

3.2 海拔梯度对消落带土壤养分空间分布的影响

王晓荣等^[20]在三峡成库初期分别对库区消落带土壤理化性质的变化进行了调查研究,发现水位消涨引起了消落带土壤养分的流失,使得土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量的显著下降。水位消涨通过2种方式对土壤养分及其分布造成影响,一方面通过水流的冲刷带来大量的泥沙,丰富了消落带土壤的营养物质,尤其是有机质含量^[21];另一方面水位变动使得土壤处于淹没、暴晒、雨淋等环境,周期性的变动加速了土壤凋落物的分解以及土壤对养分的吸收、沉淀、吸附等活动,也活跃了土壤的营养物质向外界的释放、运动、扩散活动,造成土壤养分流失^[22]。由于不同海拔梯度消落带出露和淹没的时间与季节有着较大差异,消落带土壤出露时间随海拔增高而增高。土壤的氧气、温度和湿度等环境因子以及土壤微生物的活动在不同海拔梯度之间存在较大的异质性,消落带土壤养

分特别是有有机质的积累与分解在空间分布上有着显著差异^[22]。消落带下部出露时间最短,受水位冲刷及浸泡的时间最长。土壤受水位波动影响的时间处于夏季,期间温度最高,土壤水分充足,土壤微生物的活力最强,凋落物以及土壤有机质的分解较为强烈,其后又经历长时间的水淹,养分不断由土壤向营养物质浓度相对较低的水体释放,土壤养分的含量最低;消落带上部出露时间的最长,受水位冲刷及浸泡的时间最短,但受干旱和高温胁迫的时间却最长。土壤具有氧气充足和干燥的特点,凋落物以及土壤有机质能进行一定程度的分解,但受雨水冲刷的作用相对较强,土壤的养分含量相对较低;相对而言,消落带中部受水位波动的时间最长,土壤氧气、温度和湿度条件最好,凋落物以及土壤有机质的分解最为彻底,且受水位消涨引起的流失相对较低,而水位的长期波动与停留有利于养分的层积与固定,土壤养分含量最高。本研究中,消落带土壤在经历多次大幅度水位消涨影响后,土壤养分随着海拔梯度的变化呈现出了随海拔梯度升高而升高,到海拔165m处达到最高,继而下降的空间分布格局。

水位消涨会引起植被组成与结构的变化,并由此影响到土壤养分的积累^[23]。多数调查研究表明,消落带上部的植被比下部植被生长得要好,而中部的又比上部的要好^[24]。受水位消涨的影响,湿地土壤养分的空间分布与消落带植被的空间分布格局相似^[13]。植被生长状况关系到群落凋落物的数量以及植物根系对土壤养分的吸收与固定,消落带中部良好的植被生长状况也是其土壤营养处于最高值的重要因素之一。本研究中,由于不同恢复模式下植被的空间分布有所差异,个别土壤养分的空间分布也因此有所变化。其中人工恢复的各种养分的空间分布仍符合上述养分的空间分布特征,而自然恢复地的有机质和全氮的分布则是随着海拔梯度的增加而不断增加。这主要是因为自然恢复样地在海拔170~175m处受人为影响较小,植物群落生长状况相对较好,且消落带上缘有一些乔木和灌木植物的分布,群落中积累的枯枝落叶较多,形成了相对较多的腐殖质,其有机质和全氮含量较高。

4 结论

(1)植被恢复模式对消落带土壤养分有着显著影响。人工恢复地的主要土壤养分含量显著高于自然恢复地,其中又以土壤有机质和全氮含量的差异为大,而全磷和全钾的差异相对较小,表明人工植被恢复对

土壤养分,特别是有机质和全氮在土壤中的积累与固有着积极作用。

(2)土壤养分的空间分布更多的是受海拔梯度的影响。在三峡库区反季节水位消涨影响下,消落带土壤养分含量总体上随海拔梯度的增加呈先增加后减少的空间分布格局,在海拔165 m处达到最高值。但植被恢复模式对养分的空间分布仍有一定影响。人工恢复地各主要土壤养分的空间分布均保持上述分布格局,而自然恢复地土壤有机质和全氮的空间分布则随着海拔梯度的增加一直呈增加的趋势。

(3)恢复模式对土壤养分及其空间的影响实际上是和植被的恢复与生长状况有关。人工恢复模式下通过人工种植一些物种加快了植被恢复进程,植被的生长状况普遍好于自然恢复地,其对土壤养分的吸收和固定能力得以增强。关于植被类型以及生长状况与土壤养分的关系将在后续的研究中予以进一步研究和报道。此外,人工恢复中适宜物种筛选及其应用也会对土壤养分状况产生影响,这也是值得进一步研究。

参考文献:

[1] 刘贵华,刘幼平,李伟.淡水湿地种子库的小尺度空间格局[J].生态学报,2006,26(8):2739-2743.
LIU Gui-hua, LIU You-ping, LI Wei. Small-scale heterogeneity in seed bank of a freshwater marsh[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2739-2743. (in Chinese)

[2] 王强,袁兴中,刘红,等.三峡水库156 m蓄水后消落带新生湿地植物群落[J].生态学报,2009,28:2183-2188.
WANG Qiang, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, et al. Plant communities in newly created wetlands in water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir after flooding to 156 m height[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28:2183-2188. (in Chinese)

[3] 卢志军,李连发,黄汉东,等.三峡水库蓄水对消落带植被的初步影响[J].武汉植物学研究,2010,28(3):303-314.
LU Zhi-jun, LI Lian-fa, HUANG Han-dong, et al. Preliminary effects of impounding on vegetation in drawdown zone of the Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2010, 28(3): 303-314. (in Chinese)

[4] Abrahams C. Climate change and lakeshore conservation: A model and review of management techniques[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 613(1):33-43.

[5] 卢志军,江明喜.三峡库区消落带植被恢复策略[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2012,29(3):27-30.
LU Zhi-jun, JIANG Ming-xi. Vegetation restoration strategy in Three Gorges Reservoir hydro-fluctuation zone[J]. *Journal of Chongqing Normal University(Natural Science)*, 2012, 29(3):27-30. (in Chinese)

[6] 钟芳,柴晓虹,王国基,等.植被恢复方式对黄土丘陵区土壤理化

性质及微生物特性的影响[J].中国沙漠,2014,34(4):1064-1072.
ZHONG Fang, CHAI Xiao-hong, WANG Guo-ji, et al. Soil physical-chemistry and microbial characteristics under different vegetation restoration modes in the loess hilly region[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(4):1064-1072. (in Chinese)

[7] 杨万祯,韦春,连兵,等.石羊河流域不同土地利用方式的土壤肥力特征[J].甘肃农业大学学报,2011,8(4):112-117.
YANG Wan-zhen, WEI Chun, LIAN Bing, et al. Soil fertility characteristics under different land-use patterns in Shiyanghe Basin[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2011, 8(4):112-117. (in Chinese)

[8] 彭文英,张科利,杨勤科,等.退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J].地域研究与开发,2006,25(3):94-99.
PENG Wen-ying, ZHANG Ke-li, YANG Qin-ke, et al. Forecast of impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of Loess Plateau[J]. *Areal Research and Development*, 2006, 25(3):94-99. (in Chinese)

[9] JIN Xiaodan, HE Yiliang, George K, et al. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics of the sediment in the Yangtze River estuary reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 55:62-66.

[10] 徐德星,秦延文,张雷,等.三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究[J].环境科学,2009,30(5):1338-1343.
XU De-xing, QIN Yan-wen, ZHANG Lei, et al. Phosphorus forms and its distribution characteristics in sediments and soils of water-level-fluctuating zone of the backwater reach from input river of Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(5):1338-1343. (in Chinese)

[11] WANG Yafeng, FU Bojie, LV Yihe, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2011, 85(1):58-66.

[12] 郑志伟,邹曦,安然,等.三峡水库小江流域消落区土壤的理化性状[J].水生态学杂志,2011,32(4):1-6.
ZHENG Zhi-wei, ZOU Xi, AN Ran, et al. Soil physical and chemical properties in water-level-fluctuation zone in Xiaojiang watershed in Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(4):1-6. (in Chinese)

[13] 谭淑瑞,朱明勇,张克荣,等.植物对水淹胁迫的响应与适应[J].生态学报,2009,28(9):1871-1877.
TAN Shu-rui, ZHU Ming-yong, ZHANG Ke-rong, et al. Response and adaptation of plants to submergence stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(9):1871-1877. (in Chinese)

[14] 张全军,于秀波,钱建鑫,等.鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征[J].生态学报,2012,32(12):3656-3669.
ZHANG Quan-jun, YU Xiu-bo, QIAN Jian-xin, et al. Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12):3656-3669. (in Chinese)

[15] 丁秋祜,白军红,高海峰,等.黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤养分含量特征[J].农业环境科学学报,2009,28(10):2092-2097.
DING Qiu-yi, BAI Jun-hong, GAO Hai-feng, et al. Soil nutrient con-

- tents in Yellow River delta wetlands with different plant communities [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10):2092-2097. (in Chinese)
- [16] 杨予静, 李昌晓, 马明. 三峡水库城区消落带人工草本植被土壤养分含量研究[J]. 草业学报, 2015, 24(4):1-11.
YANG Yu-jing, LI Chang-xiao, MA Ming. Nutrient content of soils under artificial grass vegetation in the urban hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(4):1-11. (in Chinese)
- [17] Wang J, Gang Li, Xiu W, et al. Responses of soil microbial functional diversity to nitrogen and water input in *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia, northern China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(4):343-350.
- [18] 白军红, 高海峰, 肖蓉, 等. 向海湿地不同植物群落下土壤有机质和全磷的空间分布特征[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(1):31-34.
BAI Jun-hong, GAO Hai-feng, XIAO Rong, et al. Spatial distribution of organic matter and total phosphorous in marsh soils with different plant communities in Xianghai wetland[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2011, 27(1):31-34. (in Chinese)
- [19] 杨小波, 胡荣桂. 热带滨海沙滩上森林植被的组成成分与土壤性质的研究[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4):6-11.
YANG Xiao-bo, HU Rong-gui. The floral components and soil properties of forest on the tropical sandy beach[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(4):6-11. (in Chinese)
- [20] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区消落带初期土壤养分特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2):281-289.
WANG Xiao-rong, CHENG Rui-mei, XIAO Wen-fa, et al. Soil nutrient characteristics in juvenile water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2):281-289. (in Chinese)
- [21] 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 Quan-shui, CHENG Rui-mei, 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. (in Chinese)
- [22] 郭劲松, 黄轩民, 张彬, 等. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2):213-219.
GUO Jin-song, HUANG Xuan-min, ZHANG Bin, et al. Distribution characteristics of organic matter and total nitrogen in the soils of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2):213-219. (in Chinese)
- [23] 朱妮妮. 三峡库区秭归-巫山段消落带植被和土壤性状时空动态研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2014:74-91.
ZHU Ni-ni. The space-time dynamic of vegetation and soil properties in the Three Gorges Reservoir hydro-fluctuation belt in Zigui-Wushan [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014:74-91. (in Chinese)
- [24] 王建超, 朱波, 汪涛. 三峡库区典型消落带淹水后草本植被的自然恢复特征[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(5):603-610.
WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao. Characteristics of restoration of natural herbaceous vegetation of typical water-level fluctuation zone after flooding in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(5):603-610. (in Chinese)