

# 三峡库区消落带几种草地根系分布及土壤养分变化

钟荣华<sup>1,2</sup>, 鲍玉海<sup>1</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>, 高进长<sup>1,2</sup>, 阎丹丹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 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 10004)

**摘 要:**为明确三峡水库消落带典型草本植物根系分布及土壤养分的变化,在三峡腹地忠县石宝镇消落带选取牛鞭草(*Hemarthria altissima*)、扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)、双穗雀稗(*Paspalum paspaeoides*)和自然恢复草地,利用 WinRhizo Pro. 2009 c 根系分析系统和常规统计方法对比研究了 4 种典型草地植物根系在土壤剖面分布及其对土壤剖面养分的影响。结果表明:四种草地的根系大部分都分布在 0—5 cm 土层中,根长密度(Root length density, RLD)、根面积比(Root area ratio, RAR)均沿土壤深度程幂函数递减分布。植被及其根系的存在对土壤养分的剖面分布有重要影响。裸地的土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)和总 N 含量要显著低于草地,扁穗牛鞭草和自然恢复草地的全量养分大都要高于其他草地。四种草地类型的 RLD, RAR 与 SOC、总 N 含量均有显著( $p < 0.05$ )或极显著( $p < 0.01$ )相关。可见本研究涉及几种植物的根系对土壤养分分布有重要影响。研究结果可以为三峡水库消落带植被恢复和水土保持提供一定的依据。

**关键词:**根系分布; 土壤养分; 植被恢复; 三峡水库; 消落带

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)02-0151-07

## Root Distributions of Several Grasslands and Soil Nutrient Variation in the Riparian Zone of Three Gorges Reservoir

ZHONG Ronghua<sup>1,2</sup>, BAO Yuhai<sup>1</sup>, HE Xiubin<sup>1</sup>, GAO Jinzhang<sup>1,2</sup>, YAN Dandan<sup>1,2</sup>

(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:** To understand the root distribution in the soil profile and its influence on soil nutrients, roots of *Hemarthria altissima*, *Hemarthria compressa*, *Paspalum paspaeoides* and natural recovery grass and soils from these grasslands were investigated in the riparian zone of Three Gorges Reservoir. Root analysis systems (WinRHIZO Pro. 2009c) was used to characterize the root systems and conventional statistical analysis methods were used to describe root distributions in soil profiles and their relationship with soil nutrients. The results showed that roots mainly distributing in 0—5 cm soil layer, root length density (RLD) and root area ratio (RAR) decreased as the power law function with soil depth. The plant and root systems have significant impact on the distributions of soil nutrients in soil profiles. Soil organic carbon (SOC) and total N content in the bare land were significantly lower than those in the grasslands. Total nutrients in *H. compressa* land and natural recovery land were higher than those in the other grasslands. The RLD and RAR were significantly correlated with SOC and total N content in four studied grasslands.

**Keywords:** root distribution; soil nutrient; revegetation; riparian zone; Three Gorges Reservoir

水库消落带是指由于水位季节性涨落而使水库周边被淹没土地周期性出露水面的一段特殊区域,通常指水库最低水位线至最高水位线之间的地貌单元,是水陆生态系统的交错地带<sup>[1]</sup>。三峡水库消落带是三峡库区的重要组成部分,其生态、环境的健康是库

岸稳定和水库安全运行的重要保障<sup>[2]</sup>。按照三峡水库调度计划,在每年 5 月末或 6 月初水位维持防洪限制水位 145 m,10 月开始逐渐升高水位直至 175 m,于次年 4—6 月再次回落(图 1),从而库区两岸长时期形成垂直落差高达 30 m、总面积将近 349 km<sup>2</sup> 的

收稿日期: 2014-8-29

修回日期: 2014-11-23

资助项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2XB309-02); 国家自然科学基金青年基金(41201272); 国家科技支撑计划(2011BAD31B03); 中国科学院西部之光人才培养计划一般项目

第一作者: 钟荣华(1987—),男,江西瑞金人,在读博士,主要从事消落带土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhrhua1987@163.com

通信作者: 贺秀斌(1967—),男,陕西镇安人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: xiubinh@imde.ac.cn

消落带<sup>[3]</sup>。由于三峡水库消落带水位高差大(30 m),淹没时间长(超过半年),反季节调节,再加上面积大、分布区域广且周边城镇密集<sup>[4]</sup>,对消落带的土壤、植被、地貌等都造成了较大影响,导致消落带植被退化消亡<sup>[5-6]</sup>,土壤侵蚀与泥沙淤积过程强烈<sup>[7-9]</sup>,土壤退化严重<sup>[9-11]</sup>,地貌极其不稳定<sup>[12]</sup>,进而威胁库区生态环境和生活生产安全<sup>[13]</sup>。因此重建三峡水库消落带的植被、控制土壤侵蚀是保障库岸稳定和水库安全运行的必然选择<sup>[14]</sup>。

植物根系在提高土壤抗侵蚀能力、防止土壤侵蚀方面具有重要作用,其一方面通过根系在土体中交错、穿插,网络串联固持土壤,另一方面通过改善土壤的物理性质,如渗透性、含水率等来提高土壤自身的水力学性质,从而提高土壤抗冲性、抗蚀性,最终增强土体的抗侵蚀能力<sup>[15-17]</sup>。同时作为连接植物和土壤的纽带,根系对土壤中养分向植物体的输送以及在土壤中的运移有重要影响<sup>[18-20]</sup>。研究消落带植物的根系特征对认识消落带的土壤、植被演化规律及植被重建具有重要的科学意义。尽管已有一些研究探讨了三峡消落带植物根系对土壤抗侵蚀性能、物理性质及酶活性的影响<sup>[21-25]</sup>,对于消落带人工恢复重建植被和自然恢复植被的根系分布特征及其对土壤养分的影响研究则少有报道。因此,本文选取三峡水库忠县石宝镇消落带坡度为 0°、坡向类似的三种人工恢复草本及近似自然恢复消落带草本为对象,研究其根系沿土壤剖面的分布特征及其对土壤养分的影响,并分析消落带干湿交替变化对根系及土壤养分的可能影响,以期对三峡水库消落带的植被重建提供依据。

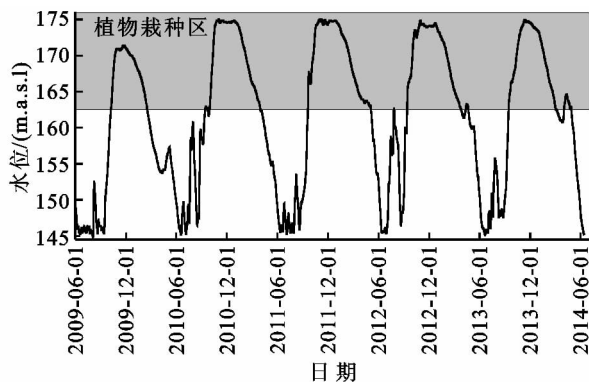


图 1 三峡消落带水位变化

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

忠县石宝镇地处重庆市东北部三峡库区腹心地带(东经 107°32′—108°14′,北纬 30°03′—30°35′)。距离忠县县城 32 km,地处忠县、石柱、万州三县(区)

交界处。境内低山起伏,溪河纵横交错,属典型的丘陵地貌,出露岩层为侏罗纪沙溪庙砂页岩,土壤类型有紫色土、黄壤、黄棕壤、石灰土和水稻土等,以紫色土为主,土地利用方式主要有旱地、水田、林地等,森林覆盖率 28.6%。该区域地处暖湿亚热带东南季风区,温热寒凉,四季分明,雨量充沛,日照充足,年均降雨量 1 150 mm,年均温 19.2℃<sup>[11]</sup>。消落带回水区内地形起伏较大,易风化岩层出露较多,淹水前多为水稻田和旱地,因夏季降雨多且集中,加之库水、波浪冲刷剧烈,水土流失极其严重<sup>[7]</sup>。受人为清库和初期水淹的影响,消落带内原生植被早已消失殆尽,形成以次生植被(主要是草本植物)和弃耕地为主的植被类型。

### 1.2 样地设置及采样

于 2013 年 5 月中旬消落带退水后,在石宝镇共和村消落带 173 m 高程处分别选择牛鞭草(*Hemarthria altissima*)、扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)和双穗雀稗(*Paspalum paspaeoides*)3 种人工恢复草本和自然恢复杂草(Natural recovery grasses)4 条消落带样带。其中 3 种人工恢复草本种植于 2007 年,从 2010 年 10 月三峡水库首次达到 175 m 蓄水后,经受了 3 a 的周期性淹没和暴露,长势良好,覆盖度均在 90% 以上;自然恢复杂草主要优势种群为狗牙根,覆盖度 90% 以上。各样带地形地貌类似,均为平坡,土壤类型为紫色土,土壤质地主要为壤质黏土。四种草本类型各选取一 5 m×2 m 样带,四条样带相邻。在各样带按 S 型曲线选取 5 个样点,选择健壮的植株,去除植株的地上部分后,在每个样点用国产 XDB0 307 单一根钻(内径 10 cm,一次采样长度 15 cm)以植株为中心点,圆心与中心点重合,沿着植株竖直向下钻取取样。根据现场挖坑及钻样观测,消落带 173 m 高程处绝大多数的根系都分布于 0—20 cm 土层,故本研究在用根钻取样时每 5 cm 取一层,按 0—5,5—10,10—15,15—20,20—25 cm 土层深度取样,各样带每层取 3 个重复,共采土壤—根系复合样品 60 个。再在四条草本植物样带周边随机选取地形地貌相似的 5 个裸地样点,每个样点同样分层取样至 25 cm 深,每层 3 个重复,将 5 个样点土壤合为一个作为裸地样,共采集裸地土壤样品 15 个。将样品去除有机残体、杂质等,编号,装封口袋带回实验室分析。

### 1.3 根系提取与分析

将带回实验室的土样置于 0.5 mm 的尼龙网筛内进行反复冲洗,直至洗出所有根系。根系冲洗过程中发现四种草本根系的死根主要呈黑色,而活根则主要呈白色、淡黄色和褐色。因此根据根系颜色辨别死根和活根,所有死根挑除后将所有活根系用清水洗净

置于加拿大产 Epson Twain Pro 扫描仪中在 400 dpi 下进行灰度扫描获取根系形态图像,然后用 WinRhizo Pro. 2009 c 系统分析根系的长度、体积、表面积、直径和根尖数量等指标。利用分析结果计算各根系指标:根长密度,即单位土体内根系总长( $\text{cm}/\text{cm}^3$ );根面积比,即单位面积土体内根系面积所占比例。

1.4 土壤养分测定方法

土壤有机碳和总氮含量用 Vario Macro cube 元素分析仪测定,全磷用酸熔钼锑抗比色法测定,全钾用火焰光度法测定<sup>[26]</sup>。本研究采样点所有土壤质地、容重和水分差别较小,可视为处于同一水平。

1.5 数据处理

所有数据采用 SPSS 20.0 进行统计分析,显著性运用最小极差法分析,用 Origin 8.6 软件作图。

2 结果与分析

2.1 根系在土壤中的垂直分布特征

根系的根长密度,即单位土壤体积中所含根系的总长度,既能反映根系的穿插和缠绕能力,也能表征某一土壤层的根系伸展量<sup>[23]</sup>。图 2a 显示不同草本类型的根长密度均随土壤深度的增加而急剧减少。各草本类型的根系集中分布在 0—10 cm 土层,尤其是 0—5 cm 土层,其根长密度是其他土层的 15 倍以上。在 0—5,5—10,10—15 cm 土层中,均是双穗雀稗根长密度最大,其次是扁穗牛鞭草和牛鞭草,自然恢复杂草最小。在 15~20 cm 土层中,扁穗牛鞭草的根长密度最大,牛鞭草次之,双穗雀稗和自然杂草均较小。而在 20—25 cm 土层中所有四种植物的根长密度均较小,其大小顺序为牛鞭草>扁穗牛鞭

草>双穗雀稗>自然恢复杂草。三种人工恢复草本在 0—5,5—10,10—15 cm 土层的根长密度分布与自然恢复杂草之间均有显著性差异( $p<0.05$ ),牛鞭草和扁穗牛鞭草之间的根长密度差异不显著。在 15—20,20—25 cm 土层中,均表现为牛鞭草、扁穗牛鞭草与自然杂草组之间差异显著,双穗雀稗与自然恢复杂草差异不显著。在整个 0—25 cm 土层中,四种草本类型在不同土层中的分布有显著性差异,三种人工恢复草本的总根长均要大于自然恢复杂草。根面积比(RAR)反映根系面积在土壤中所占比例,其大小对土壤物理性质和根系对土壤养分的吸收有重要影响。研究区四种不同草本类型根面积比分布特征如图 2b 所示,四种草地的 RAR 在 0—5 cm 土层中较大,在 5—25 cm 土层中显著减小。在 0—5 cm 土层中,扁穗牛鞭草与其他草地的根面积比有显著性差异,大小表现为扁穗牛鞭草>自然恢复杂草>牛鞭草>双穗雀稗。而在 5—25 cm 土层中,四种草本类型的根面积比均不超过 0.004,进一步说明它们的根系主要分布在表层 0—5 cm 中,而后迅速减少。各种草本类型的根长密度和根面积比随土层深度的增加均呈递减趋势,通过对根长密度、根面积比与土层深度进行拟合分析,发现其遵从幂函数分布,表达式为:

$$y = ax^b \tag{1}$$

式中: $y$ ——根长密度或根面积比; $x$ ——土壤深度; $a, b$ ——方程率定参数。各草本类型的拟合关系程如下表,相关指数均较高,表明根长密度、根面积比与土层深度均具有较好的幂函数关系,随着土层深度的增加,RLD 和 RAR 都大幅减少。

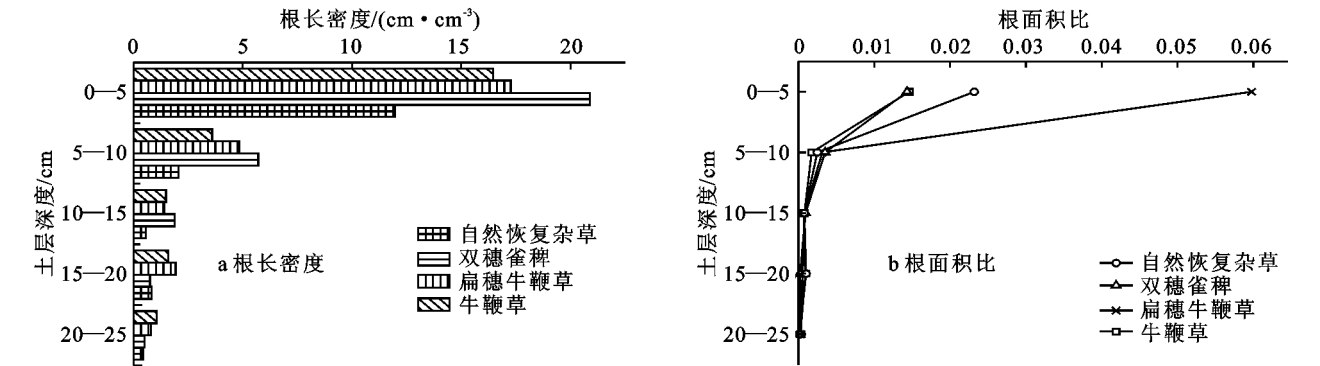


图 2 不同植被根系随土壤剖面的变化

2.2 不同植被覆盖下土壤养分变化

植被的存在对土壤养分的分布有重要影响。图 3 显示不同植被覆盖下,土壤不同养分的剖面分布不尽相同。

其中 SOC 和总 N 含量均呈现为表层(0—5 cm)显著高于其他土层,扁穗牛鞭草地含量最高,牛鞭草、

双穗雀稗和自然恢复草地相当,裸地显著低于其他草本覆盖地。而全 P 和全 K 含量均显示自然恢复杂草地和扁穗牛鞭草地要显著高于裸地、牛鞭草地和双穗雀稗地。扁穗牛鞭草地和自然恢复草地(0—15 cm 土层)中全 P 含量显著高于其他土地类型。全 K 含量也是扁穗牛鞭草地和自然恢复草地较高,双穗雀稗

地次之,牛鞭草地和裸地最低。全 P 大都沿剖面分布有逐步下降趋势,而全 K 并没有明显变化趋势。总体上植被的存在对 SOC 和总 N 含量的剖面分布影响明显,而对全 P 和全 K 的影响并不显著。

表 1 四种草本类型的根长密度、根面积比与土层深度的拟合关系

根系指标	草本类型	拟合方程	相关指数( $R^2$ )	显著性水平 $p$
根长密度	牛鞭草	$y = 207.229x^{-1.688}$	0.948	$<0.01$
	扁穗牛鞭草	$y = 307.579x^{-1.827}$	0.938	$<0.01$
	双穗雀稗	$y = 1091.990x^{-2.378}$	0.990	$<0.01$
	自然杂草	$y = 249.917x^{-2.025}$	0.918	$<0.05$
根面积比	牛鞭草	$y = 0.475x^{-2.296}$	0.976	$<0.01$
	扁穗牛鞭草	$y = 7.952x^{-3.228}$	0.946	$<0.01$
	双穗雀稗	$y = 2.042x^{-2.924}$	0.976	$<0.01$
	自然杂草	$y = 2.693x^{-2.958}$	0.905	$<0.05$

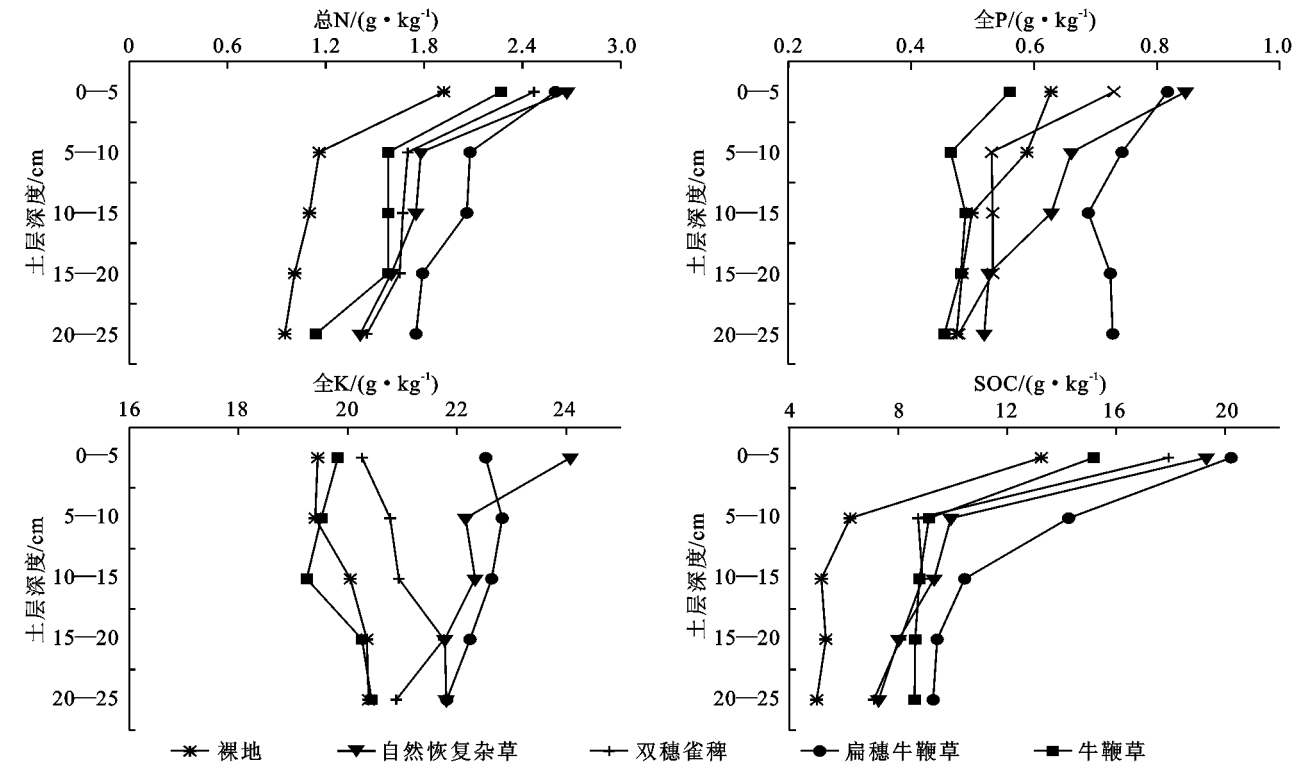


图 3 不同草本覆盖下土壤养分割面分布变化

2.3 根系与土壤剖面养分相关分析

作为连接植物和土壤的纽带,根系对土壤中养分向植物体的输送以及在土壤中的运移有重要影响<sup>[19]</sup>。土壤养分和根长密度的相关性分析(表 2)显示不同植被覆盖下 RLD,RAR 与 SOC、总 N 含量的相关性均达到了显著( $p<0.05$ )或极显著水平( $p<0.01$ )。牛鞭草地植物根系、SOC 和总 N 与全 P、全 K 的相关性不是很强。扁穗牛鞭草地和双穗雀稗地根系、SOC 与全 P 显著或极显著相关,但与全 K 相关性不显著。自然杂草地根系与各土壤全量养分及养分之间相关性均达到显著或极显著水平。裸地的土壤全量养分之间除 SOC 与总 N 含量之间相关性显著外,其他养分之间相关性均不显著。

3 讨论

3.1 不同植物的根系分布特征

由于物种和生长环境的差异,不同植物在不同生境下的根系分布差异明显,如图 2 所示,本文所涉及四种草本类型的根系主要分布在 0—5 cm 土层中,而且根系分布最深大都不会超过 25 cm,而有研究表明消落带上部根系伸展深度可达 30 cm 以上<sup>[22]</sup>,可能是因为消落带在水淹胁迫影响植物根系的生长发育,加之库水对土壤的不断冲刷,土层变浅,根系暴露,分布深度变浅。而根长密度和根面积比随土层深度主要成幂函数减少,这与李勇<sup>[17]</sup>、韩凤朋<sup>[19]</sup>、李建兴<sup>[23]</sup>等人的研究结果认为根系分布随土层深度呈指

数函数分布相似,却又有所差异。这有可能是因为本研究的消落带根系在土壤面中的分布较浅,大部分根系分布在 0—10 cm 表层有关,导致根系在剖面呈幂函数分布。

表 2 土壤养分和根长密度(RLD)、根面积比(RAR)的相关性分析

植被类型		RAR	RLD	SOC	全 P	全 K	总 N
牛鞭草	RAR	1	0.998**	0.999**	0.588	−0.099	0.906*
	RLD		1	0.995**	0.55	−0.115	0.888*
	SOC			1	0.622	−0.074	0.923*
	全 P				1	0.46	0.871
	全 K					1	0.207
	总 N						1
扁穗牛鞭草	RAR	1	0.983**	0.919*	0.915*	0.200	0.908*
	RLD		1	0.971**	0.939*	0.330	0.935*
	SOC			1	0.900*	0.493	0.956*
	全 P				1	0.115	0.771
	全 K					1	0.564
	总 N						1
双穗雀稗	RAR	1	1	0.983**	0.968**	−0.757	0.977**
	RLD		1	0.982**	0.967**	−0.759	0.977**
	SOC			1	0.992**	−0.694	0.993**
	全 P				1	−0.611	0.999**
	全 K					1	−0.642
	总 N						1
自然杂草	RAR	1	0.999**	0.988**	0.924*	0.974**	0.970**
	RLD		1	0.989**	0.930*	0.970**	0.970**
	SOC			1	0.951*	0.991**	0.994**
	全 P				1	0.961**	0.971**
	全 K					1	0.985**
	总 N						1
裸地	SOC	—	—	1	0.831	0.479	0.992**
	全 P	—	—		1	0.479	0.853
	全 K	—	—			1	0.382
	总 N	—	—				1

\*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;\* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

图 2 显示四种草地的 RLD,双穗雀稗最高,牛鞭草和扁穗牛鞭草次之,自然恢复草地最低,而 RAR 则是扁穗牛鞭草>自然恢复杂草>牛鞭草>双穗雀稗,这主要是由于不同草根本系的直径粗细和根系数量差别导致计算的 RAR 值与根长密度分布相异。

3.2 不同植被覆盖下的土壤养分

如图 3 所示,不同植被覆盖下,土壤全量养分的剖面分布不尽相同。其中与裸地相比,四类草地的土壤有机碳和总 N 含量明显要高,而全 K、全 P 却并没有显著差异。这主要是因为植物的存在可以提供较多的植物残体和腐殖质,其分解和转化产生有机质<sup>[27]</sup>,加上根系的周转<sup>[5]</sup>,因而同一小区域有植物覆盖地的土壤有机碳含量自然比裸地要高。而氮在土

壤中主要以无机态氮形式存在(95%以上),土壤全 N 与土壤有机碳含量存在显著的相关性,所有影响土壤有机碳(有机质)含量的因素,都影响到土壤全 N 含量<sup>[26-27]</sup>。加之植被本身可以固持土壤养分,氮素随径流流失、淋溶流失降低。因此有机质含量高的四种草地,其土壤总 N 的含量也高。而土壤 P、K 大部分以无机形态存在,其含量的高低主要与母质、土壤水热条件及土壤的发育程度有关<sup>[26]</sup>,因此裸地与草地比较,土壤全 K、全 P 含量并没有显著的差别。值得注意的是,图 3 显示大部分情况下(0—15 cm 土层),扁穗牛鞭草和自然恢复草地的土壤全量养分要高于其他草地和裸地,这可能是因为在本文研究区内,扁穗牛鞭草及自然草地中狗牙根长势较好,植被茂密,有

助于消弱降雨径流和库水对土壤的淋溶和冲刷,减少养分的流失。

### 3.3 根系对剖面养分分布的影响

根系的存在可以改善土壤环境,加快土壤养分的运移速率,同时通过吸收使养分在植物体内累集,植株凋亡后再重新被土壤吸附<sup>[27]</sup>。研究显示扁穗牛鞭草和自然恢复草地的根面积比要显著大于其他草地(图2b),这也是导致图3中扁穗牛鞭草地和自然草地土壤养分在大部分土层中相较其他草地要高的原因之一。图3显示与无根系的裸地相比,各个土层有根系的四种草地的土壤有机碳和总N含量明显要高,说明根系对养分的影响还是很明显。而表2显示四种草地根系与土壤有机碳、总N和全P大都具有显著或极显著的正相关性(除牛鞭草地不显著外),进一步说明根系对土壤养分的有重要影响,这与韩凤鹏等人的研究结果相吻合<sup>[19]</sup>。不过除自然恢复杂草地外,其他植被类型下的土壤全K含量与根系及其他养分指标相关性不显著,甚至还出现了负相关,这有可能与消落带干湿交替环境变化影响土壤K含量有关。关于消落带干湿交替对土壤养分的影响机制还需要进一步探讨。

### 3.4 植被恢复方式对土壤养分的影响

图3显示,裸地相较其他有根系草地,大部分土壤全量养分含量要低,尤其是土壤有机碳和总氮含量要低得多,说明植被恢复确实可以减少土壤养分向三峡水库的排放,起到固土截污的效应。而人工草地与自然草地相比较,扁穗牛鞭草地的全量养分要高于自然恢复草地,双穗雀稗和牛鞭草地的大部分全量养分却要低于自然恢复草地,这与说明不同的人工恢复植被对消落带土壤养分的影响有所差异,在进行水库消落带植被时,植物的选取要因地制宜。Ye Chen等人的研究表明,三峡水库消落带人工恢复草地的SOC和土壤氮含量要高于自然恢复草地<sup>[10]</sup>。这可能是因为本文研究选取的样地是在消落带上部,受水淹影响较小,自然恢复草地和人工恢复草地长势相当,甚至还要好所致其土壤养分差异不明显。

当然,本文仅对消落带173 m高程处的四种草地进行研究,难以反映淹水强度对植物根系和土壤养分的影响。三峡水库消落带不同高程处草地对应不同淹水强度植物根系和土壤养分的变化还有待日后进一步研究。

## 4 结论

1) 植物根系在土壤剖面的分布因植物种类及生长环境的变化而有所差异。通过对三峡水库消落带

牛鞭草、扁穗牛鞭草和双穗雀稗三种人工恢复草本和自然恢复杂草根系的对比研究发现,四种草本类型的根系大部分都分布在0—5 cm土层中,根长密度、根面积比均沿土壤深度程幂函数递减分布。不同草本类型的根系分布在不同土层中均有显著性差异。

2) 植被及其根系的存在对土壤养分的剖面分布有重要影响。不同植被覆盖下,土壤不同养分的剖面分布不尽相同。裸地的SOC和总N含量要显著低于草地,扁穗牛鞭草和自然恢复杂草地的全量养分都要高于其他草地。而全P和全K含量均显示自然恢复杂草地和扁穗牛鞭草地要显著高于裸地、牛鞭草地和双穗雀稗地。扁穗牛鞭草地和自然恢复草地(0—15 cm土层)中全P含量显著高于其他土地类型。

3) 四种草地类型的RLD,RAR与SOC、总N含量均有显著( $p < 0.05$ )或极显著水( $p < 0.01$ )相关。牛鞭草根系与全P、全K的相关性不明显,扁穗牛鞭草地和双穗雀稗地根系、SOC与全P显著相关,但与全K相关性不显著,自然杂草地根系与各土壤全量养分及养分之间相关性较强。

### 参考文献:

- [1] 艾丽皎,吴志能,张银龙. 水体消落带国内外研究综述[J]. 生态科学,2013,32(2):259-264.
- [2] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析[J]. 水土保持通报,2008,28(1):46-49.
- [3] Ye Chen, Li Siyue, Zhang Yulong, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the three gorges reservoir, China[J]. Journal of Hazardous Materials,2011,191(1/3):366-372.
- [4] 周永娟,仇江啸,王姣,等. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报,2010,30(24):6726-6733.
- [5] Ye Chen, Zhang Kerong, Deng Qi, et al. Plant communities in relation to flooding and soil characteristics in the water level fluctuation zone of the three gorges reservoir, China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2013,20(3):1794-1802.
- [6] Zhang Zhiyong, Wan Chenyan, Zheng Zhiwei, et al. Plant community characteristics and their responses to environmental factors in the water level fluctuation zone of the three gorges reservoir in China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2013,20(10):7080-7091.
- [7] 鲍玉海,贺秀斌. 三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨[J]. 水土保持研究,2011,18(6):190-195.
- [8] Bao Yuhai, Tang Qiang, He Xiubin, et al. Soil erosion in the riparian zone of the three gorges reservoir, china[J]. Hydrology Research,2013;doi:10.2166/nh.2013.291.
- [9] Tang Qiang, Bao Yuhai, He Xiubin, et al. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian

- zone of the three gorges reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 479/480: 258-266.
- [10] Ye Chen, Cheng Xiaoli, Zhang Quanfa. Recovery approach affects soil quality in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China: implications for revegetation[J]. Environmental Sciences and Pollution Research, 2014, 21(3): 2018-2031.
- [11] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1236-1244.
- [12] 张信宝. 关于三峡水库消落带地貌变化之思考[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 1-4.
- [13] Yuan Xinzong, Zhang Yuewei, Liu Hong, et al. The littoral zone in the three gorges reservoir, china: Challenges and opportunities[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(10): 7092-7102.
- [14] 王业春, 雷摇波, 张摇晟. 三峡库区消落带不同水位高程植被和土壤特征差异[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 206-212.
- [15] Adhikari A R, Gautam M R, Yu Zhongbo, et al. Estimation of root cohesion for desert shrub species in the lower colorado riparian ecosystem and its potential for streambank stabilization[J]. Ecological Engineering, 2013, 51: 33-44.
- [16] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping. Soil anti-scourability enhanced by plant roots[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(6): 676-682.
- [17] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 11-18.
- [18] Upson M A, Burgess P J. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1/2): 43-58.
- [19] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 50-55.
- [20] 王彦丽. 不同植被恢复措施下剖面根系与 SOC 的分布特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 19-23, 43.
- [21] Tenten N, Zeng Bo, Kazda M. Soil stabilizing capability of three plant species growing on the three gorges reservoir riverside[J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(6): 888-896.
- [22] 李建兴, 何丙辉, 谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [23] 李建兴, 谌芸, 何丙辉, 等. 不同草本的根系分布特征及对土壤水分状况的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 81-87.
- [24] 谌芸, 祝亚军, 何丙辉. 三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 42-45.
- [25] 李彦杰, 刘仁华, 杨俊年, 等. 水淹胁迫下三峡库区野生狗牙根根系酶活性变化[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 288-292.
- [26] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 26-75.
- [27] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.

(上接第 150 页)

- [7] 高明秀, 张芹, 赵庚星. 土地整理的评价方法及应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 300-307.
- [8] 邹利林, 王占岐, 王建英. 农村土地综合整治产业化发展盈利模式的构建[J]. 经济地理, 2011, 31(8): 1370-1374.
- [9] 郭晓楠, 王秀茹, 陈倩. 华北平原区土地整理耕地经济潜力评价研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 92-97.
- [10] 王万茂. 土地整理的产生, 内容和效益[J]. 中国土地, 1997, 9(3): 20-22.
- [11] 李岩, 赵庚星, 王瑗玲, 等. 土地整理效益评价指标体系研究及其应用[J]. 农业工程学报, 2007, 22(10): 98-101.
- [12] 刘晓, 王红瑞, 王秀茹, 等. 河北省可持续土地整理模式与效益[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 201-206.
- [13] 金贵, 王占岐, 重多, 等. 西藏土地开发整理工程类型区划分研究[J]. 国土资源科技管理, 2013, 30(5): 21-27.
- [14] 王占岐. 农用地分等中土地利用系数与经济系数的探讨: 以广东省惠州市惠城区为例[J]. 农机化研究, 2008(4): 18-21.
- [15] 周子健, 吴克宁, 马建辉, 等. 耕地质量等级监测中县域土地利用系数更新方法研究: 以北京市大兴区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2013(3): 66-72.
- [16] 张凤荣, 阚文聚. 对《农用地分等定级规程》土地利用系数的探讨[J]. 中国土地科学, 2002, 16(1): 16-19.
- [17] 钱建平, 周勇, 江建国, 等. 基于线性模型的土地利用系数和土地经济系数修正对农用地分等的影响[J]. 国土资源科技管理, 2005, 21(6): 135-138.