三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应*

徐少君　曾　波†　类淑桐　苏晓磊

（三峡库区生态环境教育部重点实验室，重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室，西南大学生命科学学院，重庆　400715）

摘　要　为明确用于三峡库区消落区植被构建的岸生植物物种根系特征与土壤抗水蚀之间的关系，对狗牙根（*Cynodon dactylon*（L）Pers.）、空心莲子草（*Alternanthera philoxeroides*（Mart）Griseb）、荻（*Triarrhena sacchariflora* Nakai）、牛鞭草（*Hemarthria compressa*（L. f.）R. Br.）、香附子（*Cyperus rotundus* L.）、野古草（*Arundinella anomala* Steud.）等 6 种耐水淹植物根系进行了研究。利用根钻（Eijkelkamp agrisearch equipment model 15.01）在野外直接取样的方法，获取了含有目标物种根系的土柱试验样品，采用改进的抗崩解装置测量土壤的水蚀速率，计算了这 6 种植物根系对土壤的抗水蚀增强系数，并使用根系分析系统（WinRHIZO Pro. 2004c）对根系特征进行了分析。研究发现，空心莲子草、荻、香附子和狗牙根的根冠比均值较大，野古草、荻具有较大的根长密度和根表面积密度；含有根系的土壤水蚀速率显著低于对照，空心莲子草、荻、野古草的土壤抗水蚀增强系数显著高于其他 3 个物种；根长密度、根表面积密度均与土壤抗水蚀增强系数之间呈极显著的线性关系；根系径级中 $D \leqslant 2$ mm 的根系与土壤抗水蚀关系最为密切，土壤抗水蚀增强系数与 $D \leqslant 2$ mm 根系的根长密度和根表积密度均呈显著的线性关系，相关系数随着径级的增加而减小。结果表明，6 物种均能显著增强土壤的抗水蚀能力，空心莲子草、荻、野古草的增强作用最为明显；根长密度、根表面积密度能很好地表征土壤的抗水蚀能力，尤其是 $D \leqslant 2$ mm 或 $D \leqslant 0.5$ mm 根系的根长密度和根表积密度，可以作为表征土壤抗水蚀能力的最重要参数。

关键词　三峡库区；消落区；耐水淹植物；土壤抗水蚀；根长密度；根表面积密度

中图分类号　S157；Q948　　**文献标识码**　A

三峡库区是水土流失严重的地区之一，特别是三峡大坝建成后所形成的库岸消落区，每年将会有 4 ~ 6 个月的时间处于被水淹没的状态，长时间的浸泡会造成库岸边坡土体的分散、崩解，进而危及堤岸甚至整个大坝的安全[1-2]，所以如何提高库岸边坡土壤的抗水蚀能力、减缓水土流失、增强库岸的稳定就显得十分必要。土壤抗水蚀（Soil anti-erodibility）是指土壤抵抗水的分散和悬浮的能力，是评定土壤抵抗侵蚀能力的重要参数之一，与土壤的理化性质密切相关[3-5]。而有研究表明，植物根系的活细胞提供分泌物，死细胞提供有机质作为土壤团粒的胶结剂，配合根系的穿插、挤压和缠绕，使土壤中有机质和大粒级水稳性团聚体增加，从而改善土壤理化性质，提高土壤的抗侵蚀能力[6-8]。因此，使用耐水淹植物构建消落区，利用植物根系增强土壤抗侵蚀能力是保护库岸边坡最有效的生物防治措施之一，已被国内外众多学者研究、实践和应用[2,9-13]。

国内研究者在对植物根系增强土壤抗侵蚀能力研究后认为，根系与土体结合程度越紧密，其对土壤的理化作用越明显，即提高土壤抗侵蚀能力越强，并认为单位土体内根系的总表面积，即所谓的根表面积密度（RSAD），是表征土壤抗侵蚀能力的最好参数，也有学者将根重密度（RWD），即单位体积土体内的根系生物量，作为衡量根系抗侵蚀能力的参数[14-16]。而根长密度（RLD），即单位土体中根

* 国家自然科学基金项目（30770406、31070474）、重庆市科技攻关项目（CSTC2007AB7049）联合资助

† 通讯作者，E-mail：bzeng@swu.edu.cn

作者简介：徐少君（1975—），男，河南南阳人，博士研究生，主要从事植物生态研究。E-mail：nancky@swu.edu.cn，xushaojun@live.cn，Tel：13667656822

收稿日期：2009－06－25；收到修改稿日期：2009－10－11

系的总长度,既能反映根系的穿插和缠绕能力,也与根表面积密度及根重密度密切相关,且易于测量又更为直观,因而也应该是表征土壤抗侵蚀能力的一个重要参数,曾被 Osman[17] 和 Mamo[18-19] 等用来表征土壤的抗侵蚀效能[20]。但前人的研究成果主要集中在根系提高土壤抗侵蚀中的抗冲性方面,对于土壤抵抗库水浸泡的抗水蚀方面关注较少[21-22],此外,这些研究成果是否适用于三峡库区消落区独特的环境,这些参数能否很好地表征三峡库区消落区植物根系对土壤抗水蚀效能,还没有相关的研究报道。因此,本文对三峡库区自然消落区常见的 6 种耐水淹岸生植物的根系及其对土壤抗水蚀增强效应进行了研究,试图解决以下问题:(1)根系的特征及其增强土壤抗水蚀的能力如何?(2)根系的根长密度、根表面积密度,根重密度是否可以表征这些物种对土壤的抗水蚀增强能力?(3)不同径级的根系特征与土壤抗水蚀的关系如何?(4)根系的哪一个参数能更好地表征土壤的抗水蚀能力?

1　材料与方法

1.1　研究物种及生长区概况

试验中所选的物种,分别是狗牙根(*Cynodon dactylon* (L) Pers.)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides* (Mart) Griseb)、荻(*Triarrhena sacchariflora* (Maxim.) Nakai)、牛鞭草(*Hemarthria compressa* (L. f.) R. Br.)、香附子(*Cyperus rotundus* L.)和野古草(*Arundinella anomala* Steud.)等 6 种常见岸生植物,生长在三峡库区嘉陵江岸北碚段的自然消落区内(N29°50′20.3″, E106°25′45.4″)(图 1),每年经历 4 ~ 9 月份汛期不同程度的水淹,经过长期的自然汛期适应,已被研究者证实有耐水淹特性,是用于三峡库区消落区植被构建和恢复的首选物种[23]。

1.2　样品获取

用于抗水蚀试验的样品为含有目标植物物种根系的土柱。在去除植株的地上部分后,使用根钻(Eijkelkamp agrisearch equipment model 15.01)直接竖直向下钻取含有目标物种根系的土柱(直径 8 cm、高 15 cm),每一物种取 4 个样品。同时在每一个物种取样点的附近钻取 4 个不含根系或含有少量根系同土壤基质的土柱,用于抗水蚀试验对照。

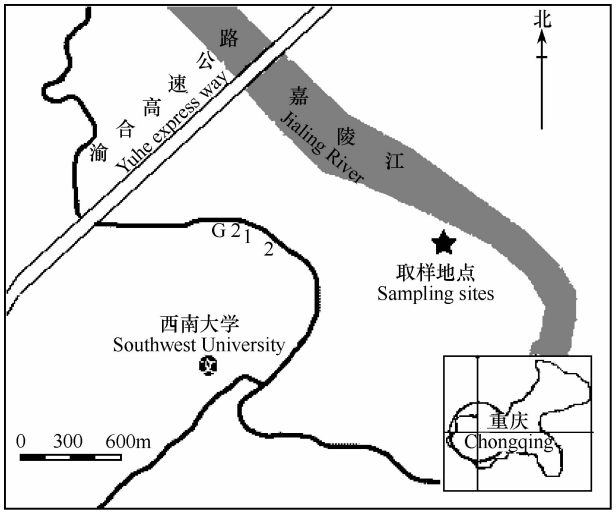

图 1　试验取样地点

Fig. 1　The location of sampling sites in Beibei

1.3　研究方法

1.3.1　土壤水蚀与抗水蚀　土壤水蚀及抗水蚀能力指标获取,采用改进的原状土抗崩解装置[3]。首先将根钻钻取的土柱用 PVC 管固定,竖直置于水盆中浸泡至饱和;然后去掉 PVC 管,将含饱和水的土柱竖直放在孔径为 2 cm 的铁网网板上,用铁丝圈固定土柱,置于静水中进行水蚀崩解试验。通过测量试验前后含饱和水土重的变化值和崩解时间,计算出土柱的水蚀崩解速率,用字母 V 表示,单位 g min^{-1}。

衡量根系对土壤水蚀速率的影响时,使用了土壤抗水蚀增强系数,用字母 E_c 表示,计算公式为

$$E_c = \Delta V / V_0 = (V_0 - V_r) / V_0 \qquad (1)$$

式中,V_0 为对照土柱的水蚀速率,V_r 为含根土柱的水蚀速率,ΔV 表示由于根系存在而使土柱水蚀速率的减缓值,E_c 值则表示由于根系的存在而使土柱水蚀崩解速率减缓的系数,即根系对土壤抗水蚀的增强系数,其值在 0 和 1 之间,0 表示根系对土壤水蚀崩解没有任何贡献,而值越接近 1,表示增强效应越明显[20]。

1.3.2　根系参数的获取　将做完抗水蚀试验的土柱在孔径 1 mm 的多层纱网内反复冲洗,直至冲洗出所有的根系,用清水洗净后,使用根系分析系统(WinRHIZO Pro. 2004c),在扫描分辨率为 200 dpi 的条件下,以 0.5 mm 为一个径级,获得总的根系以及不同径级根系的根长密度、根表面积密度等重要根系参数,最后将根系装入纸信封内在 80 ℃条件下烘 72 h,获得根系生物量。

此外,收获每一物种 50 cm^2 土壤截面上的地上部分,然后钻取这一截面下的所有根系,将根系和地上部分洗干净后,分别装入纸信封内在 80 ℃条件下烘 72 h,获取生物量,计算根冠比,每一物种 4 个重复。

2 结果与讨论

2.1 植物根系特征

2.1.1 根冠比 6 物种根冠比的均值均较大,其中空心莲子草达到了 1.94,荻和香附子分别达到了 0.97 和 0.82,但这 3 物种之间没有显著差异(图 2)。

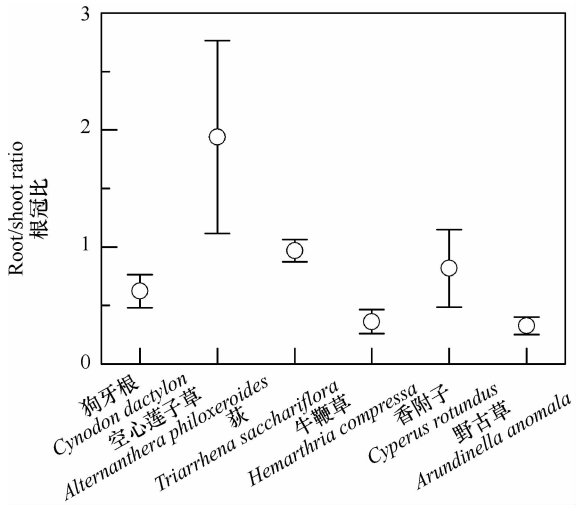

图 2 6 种耐水淹植物的根冠比

Fig. 2 Root/shoot ratios of six flooding-tolerant plants

狗牙根、空心莲子草和野古草的地下部分有着相似的特点,这些物种经历过长年的夏季汛期水淹,受到不同程度的泥沙掩埋,地上部分被泥沙掩埋后,茎节上生出大量的不定根,在提高抗侵蚀能力方面,类似于植物的根系,因此 3 物种的根系、地下茎和茎上的不定根交织一起,形成较强的固土网络。而香附子的地下根系也较为发达,除牛鞭草和野古草外,4 物种的根冠比均明显高于一般草本植物[24-25],而发达的根系对土壤稳定性的贡献是显而易见的,因此这些植物应该能很好地增强土壤的抗水蚀能力。

2.1.2 根重密度、根长密度和根表面积密度 野古草根系的根重密度、根长密度和根表面积密度的均值均较大。就根重密度而言,野古草显著高于狗牙根、荻、牛鞭草和香附子;就根长密度和根表面积密度而言,野古草和荻的均值均最高,且均显著高于其他 4 个物种(表 1)。

前人的研究成果证实,根重密度、根表面积密度能反映根系增强土壤抗侵蚀的能力,与增强能力呈正相关[14-16],据此推测,野古草、荻应具有最强的抗水蚀能力,其次为空心莲子草。

表 1 6 种耐水淹植物的根系特征参数

Table 1 Parameters of the root characteristics of 6 flooding-tolerant plants

不同物种 Different species	根重密度 Root weight density(mg cm^{-3})	根长密度 Root length density(cm cm^{-3})	根表面积密度 Root surface area density(cm^2 cm^{-3})
狗牙根 *Cynodon dactylon*	1.205 ± 0.433b	1.729 ± 0.202bc	0.244 ± 0.050bc
空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides*	2.598 ± 0.743ab	2.274 ± 0.333b	0.387 ± 0.060b
荻 *Triarrhena sacchariflora*	1.507 ± 0.217b	4.299 ± 0.618a	0.578 ± 0.079a
牛鞭草 *Hemarthria compressa*	1.754 ± 0.444b	2.478 ± 0.085b	0.373 ± 0.029b
香附子 *Cyperus rotundus*	1.124 ± 0.266b	0.815 ± 0.133c	0.168 ± 0.029c
野古草 *Arundinella anomala*	3.843 ± 0.867a	4.129 ± 0.267a	0.664 ± 0.086a

注:同一列中不同字母表示差异显著($p<0.05$) Note: Different letters in the same column indicate significant differences($p<0.05$)

2.1.3 根系特征之间的关系 根重密度、根长密度和根表面积密度之间关系密切,符合线性回归关系(图 3)。根重密度与根长密度之间的相关系数 r 值稍小,为 0.482;根重密度与根表面积密度有较高相关性,r 值达 0.629;根表面积密度与根长密度之间高度相关,r 值达 0.949。

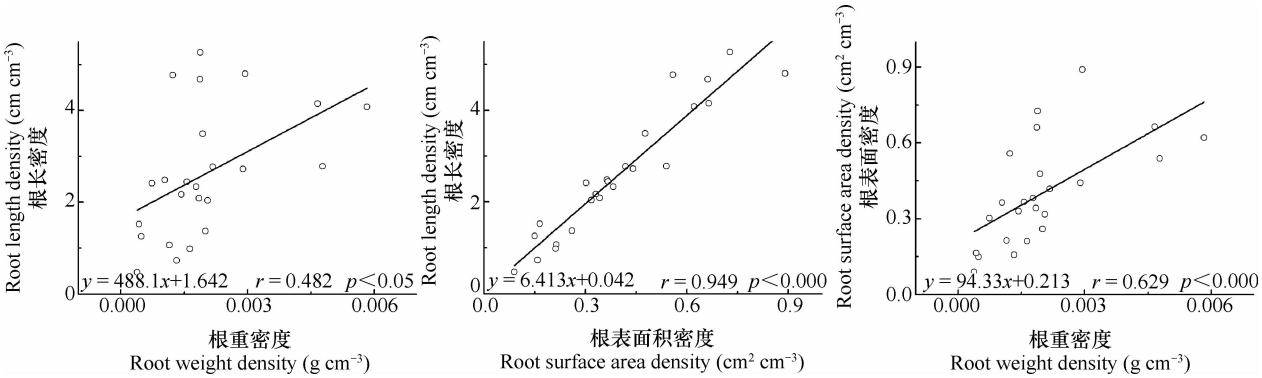

图 3　根系特征参数之间的关系

Fig. 3　Relationship between parameters of roots characteristics

根重密度是研究者用来表征土壤抗冲性增强效应的一个参数[26]。根表面积密度既与根系其他参数显著相关,也能反映根系与土体接触的紧密程度,被研究者认为是解释根系提高土壤抗侵蚀机理的另一个重要指标[14-16]。从本试验结果看,根长密度与根重密度紧密相关,与根表面积密度联系更为紧密,也应该是反映土壤抗水蚀能力的一个重要参数,但国内的研究者关注较少[27]。

2.2　土壤抗水蚀与根系特征

2.2.1　土壤水蚀　　含有耐水淹物种根系土壤的水蚀速率均极显著低于对照,其值在 12.12 ~ 33.72 g min^{-1},而对照土壤水蚀速度较高,水蚀速率超过含根土壤的 10 倍以上,其值在 251.3 ~ 358.0 g min^{-1}之间(图 4)。由此可见,植物根系能明显减缓土壤的水蚀作用。

2.2.2　土壤抗水蚀增强系数与根系参数　　在对根系增强土壤抗水蚀的能力进行衡量时,采用了与对照相比的抗水蚀增强系数来消除土质的细微差别。结果显示,6 物种根系对土壤的抗蚀系数在 0.89 ~ 0.96 之间。其中空心莲子草、荻和野古草的抗水蚀增强系数最大,分别为 0.95、0.96 和 0.96,显著高于其他 3 个物种;而牛鞭草和香附子的最小,为 0.90 和 0.89,显著低于其他 4 个物种(图 5)。可见,6 物种的抗水蚀增强系数均接近于 1,意味着均能显著增强土壤的抗水蚀能力,其中空心莲子、荻和野古草的增强作用最为明显。

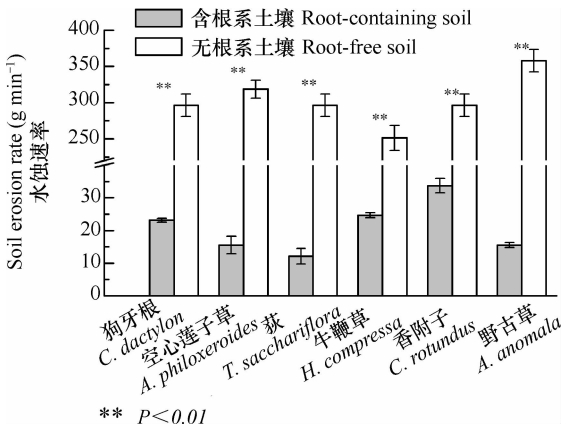

图 4　6 物种根系的土壤水蚀速率

Fig. 4　Soil erosion rates of six plants

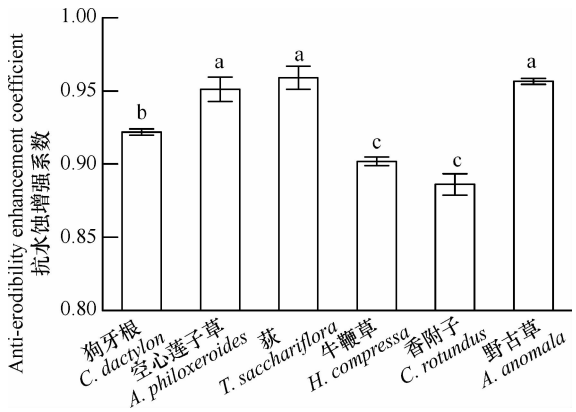

图 5　6 物种根系对土壤抗蚀增强系数

Fig. 5　Anti-erodibility enhancement coefficients of six plants

在对土壤抗水蚀增强系数与根重密度、根长密度及根表面积密度进行分析时发现,抗水蚀增强系数与根重之间无线性关系,但与根长密度、根表面积密度之间存在极显著的线性关系,其方程分别为:$y = 0.017x + 0.884$ ($r = 0.778$, $p < 0.000$), $y = 0.108x + 0.886$ ($r = 0.731$, $p < 0.000$)。可以得知,土壤抗水蚀增强效应与根长密度之间关系更为密切,即越大的根长密度,意味着

根系缠绕和串联土体的潜能越大,其增强土壤抗水蚀的能力越强。

朱显谟[28]早在19世纪60年代就指出,防止土体在水中崩散的功效主要取决于植物根系的密稠度和分布情况,蒋定生等[3]也认为,根系的穿插交织可以增强土体抗崩解的能力。根长密度能很好地表征根系在土体中的密稠度和交织穿插能力,与土壤抗水蚀增强系数的相关系数 r 值也最大,结合其与根表面积密度和根重密度之间的紧密关系(图3),可以得知,根长密度可以作为表征土壤抗水蚀能力的重要参数。

2.2.3 土壤抗水蚀增强系数与不同径级根系特征

土壤抗水蚀增强系数与直径 $D \leqslant 2$ mm 不同径级的根系特征之间关系密切,均呈现出显著的线性($p < 0.01$)关系,相关系数 r 值随着径级的增大而减小(表2)。

表2 土壤抗水蚀增强系数(E_c)与不同径级根系特征(根表面积密度(RSAD)、根长密度(RLD))之间的回归方程

Table 2 Regression equations between soil anti-erodibility enhancement coefficient and characteristics (root surface area density and root length density) of roots in different sizes ($p < 0.01$)

根系径级 Diameter class of roots	E_c 与 RSAD 之间的回归方程 Regression equation between E_c and RSAD	E_c 与 RLD 之间的回归方程 Regression equation between E_c and RLD
$D \leqslant 0.5$ mm	$y = 0.409x + 0.888$ ($r = 0.773$)	$y = 0.021x + 0.884$ ($r = 0.793$)
0.5 mm $< D \leqslant$ 1 mm	$y = 0.574x + 0.894$ ($r = 0.719$)	$y = 0.128x + 0.893$ ($r = 0.719$)
1 mm $< D \leqslant$ 1.5 mm	$y = 0.748x + 0.899$ ($r = 0.670$)	$y = 0.286x + 0.899$ ($r = 0.673$)
1.5 mm $< D \leqslant$ 2 mm	$y = 1.331x + 0.897$ ($r = 0.562$)	$y = 0.725x + 0.897$ ($r = 0.568$)

通常认为,土壤的抗水蚀与土壤内在的物理化学性质有关,但植物根系是改善土壤环境的最重要的因素[7,28-31]。李勇[32]、吴彦[5]、刘国彬[14]等认为,植物根系中的细根能显著地改变土体的理化性质,这是因为,一方面细根最能充分接触土壤,能有效地缠绕和串联土体,另一方面其分泌物对土体颗粒起到黏结作用,从而能够共同提高土壤中水稳定性颗粒的数量和大小,这样,土壤抵抗水的分散和悬浮能力明显提高,进而减缓了土壤的侵蚀速度[9,27]。从试验结果看,$D \leqslant 2$ mm 细根与土壤抗水蚀能力直接相关,$D \leqslant 0.5$ mm 细根的根长密度、根表面积密度与土壤抗水蚀增强系数的相关系数 r 分别达0.793和0.773,0.5mm $< D \leqslant 1$ mm 根系对土壤的稳定也有着较高的贡献,其次是 1 mm $< D \leqslant$ 1.5 mm 及 1.5 mm $< D \leqslant 2$ mm 的根系,而当根系 $D > 2$ mm,其与土壤抗水蚀增强系数之间无显著相关关系。由此可见,在三峡库区消落区生长的这些植物,在提高土壤稳定性、抵抗水体分散和悬浮能力中,细根起着至关重要的作用,$D \leqslant 2$ mm 径级的细根根长密度和根表面积密度均可以作为表征其抗侵蚀能力的重要参数,尤其是 $D \leqslant 0.5$ mm 细根的根长密度,与土壤抗水蚀增强系数之间的 r 值最大,可以作为根系提高土壤抗水蚀能力的最好指标。

刘定辉[7]、周正朝[15-16]认为在表征土壤抗侵蚀能力中,根表面积密度是非常重要的一个参数,认为其能很好地解释根系固土机理。从试验结果看,无论是根表面积密度,还是 $D \leqslant 2$mm 径级的根表面积密度,与土壤抗水蚀增强效能均显著相关,又同时与根系的其他各参数显著相关(图3),所以根表面积密度与根长密度一样,是表征根系对土壤抗水蚀增强效能的另一最佳参数。

3 结 论

1) 6物种均能显著增强土壤的抗水蚀能力,空心莲子草、荻和野古草的增强作用最为明显。

2) 土壤的抗水蚀增强能力随根系的根长密度、根表面积密度增大而增强,两者之间呈极显著的线性相关。

3) $D \leqslant 2$ mm 根系与土壤的抗水蚀关系密切,$D \leqslant 2$ mm 根长密度和根表面积密度与土壤抗水蚀增强系数之间呈显著线性相关,径级越小,两者的相关系数 r 值越大。

4) 根长密度、根表面积密度,尤其是 $D \leqslant 0.5$ mm 的根长密度及根表面积密度能更好地表征土壤抗蚀效能。

综上所述,6种耐水淹植物在三峡库区消落区的植被构建中,能有效地提高库岸边坡对库水浸泡水蚀的抵抗能力;根长密度和根表面积密度均是衡量植物根系提高土壤抗水蚀效能的最佳参数。

参 考 文 献

[1] 袁辉, 王里奥, 詹艳慧, 等. 三峡库区消落带健康评价指标体系. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2): 249—253. Yuan H, Wang L A, Zhan Y H, et al. Health evaluation system of the water-level-fluctuation zone in the Three Gorges area (In Chinese). Resources and Environment in the Yangzi Basin, 2006, 15(2): 249—253

[2] 李娅, 曾波, 叶小齐, 等. 水淹对三峡库区岸生植物秋华柳(*Salix variegata* Franch.)存活和恢复生长的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 1 923—1 930. Li Y, Zeng B, Ye X Q, et al. The effects of flooding on survival and recovery growth of the riparian plant *Salix variegata* Franch. in Three Gorges reservoir region (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1 923—1 930

[3] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 等. 黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究. 水土保持通报, 1995, 15(3): 20—27. Jiang D S, Li X H, Fan X K, et al. Research on the law of soil disintegration rate change and it's effect factors on the Loess Plateau (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(3): 20—27

[4] 贾恩吉, 何文安. 作物根茬对土壤物理性状的影响. 吉林农业科学, 1996(3): 55—57. Jia E J, He W A. Effect of crop stubbles on soil physical property (In Chinese). Jilin Agricultural Sciences, 1996(3): 55—57

[5] 吴彦, 刘世全, 付秀琴, 等. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究. 水土保持学报, 1997, 1(3): 45—49. Wu Y, Liu S Q, Fu X Q, et al. Study on improving soil's water stable aggregates amounts by botanic roots (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 1(3): 45—49

[6] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响. 土壤与环境, 2001, 10(3): 250—252. Wang K. Effects of plant roots on soil anti-erosion (In Chinese). Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(3): 250—252

[7] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34—37. Liu D H, Li Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 34—37

[8] 王勇, 吴金清, 黄宏文, 等. 三峡库区消涨带植物群落的数量分析. 武汉植物学研究, 2004, 22(4): 307—314. Wang Y, Wu J Q, Huang H W, et al. Quantitative analysis of plant communities in water-level-fluctuation zone within Three Gorges reservoir area of Changjiang River (In Chinese). Journal of Wuhan Botanical Research, 2004, 22(4): 307—314

[9] 韩鲁艳, 贾燕锋, 王宁, 等. 黄土丘陵沟壑区植被恢复过程中的土壤抗蚀与细沟侵蚀演变. 土壤, 2009, 41(3): 483—489. Han L Y, Jia Y F, Wang N, et al. Soil anti-erodibility and soil erosion evolution of during process of vegetation recovering in loess Hilly-Gully region (In Chinese). Soils, 2009, 41(3): 483—489

[10] Mitsch W J. Ecological engineering—the 7-year itch. Ecol Eng, 1998, 10: 119—138

[11] Docker B B. Hubble T C T. Quantifying root - reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. Geomorphology, 2008, 100: 401—418

[12] 李科云. 水库消落区种草养鱼防淤减积综合效益分析. 草地学报, 2002, 10(1): 53—58. Li K Y. A study on supplying fish feed and preventing from silts sinking in the reservoir by planting forages in the beach and barren hills among young trees (In Chinese). Acta Agrestia Sinica, 2002, 10(1): 53—58

[13] 江刘其, 陈煜初. 新安江水库消落区种植挺水树木林研究初报. 浙江林业科技, 1992, 12(1): 40—43. Jiang L Q, Chen Y C. Preliminary research on planting water-tolerant trees in the inundated area of Xinanjiang reservoir (In Chinese). Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 1992, 12(1): 40—43

[14] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究. 水土保持学报, 1998, 4(1): 93—96. Liu G B. Study on soil anti-scourability and its mechanism of grassland on Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 93—96

[15] Zhou Z C, Shangguan Z P. Soil anti - scouribility enhanced by plant roots. Journal of Integrative Plant Bioloty, 2005, 47(6): 676—682

[16] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性. 生态学报, 2006, 26(10): 3 270—3 275. Zhou Z C, Shangguan Z P. Soil anti-scouribility during vegetation succession of Ziwuling secondary forest (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3 270—3 275

[17] Osman N. Parameters to predict slope stability - soil water and root profiles. Ecol Eng, 2006, 28: 90—95

[18] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility and soil strength as influenced by plant roots. Part Ⅰ: Laboratory study. Trans ASAE, 2001, 44: 1 167—1 174

[19] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility and soil strength as influenced by plant roots. Part Ⅱ: Field study. Trans. ASAE., 2001, 44: 1 175—1 181

[20] 徐少君, 曾波. 三峡库区 5 种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究. 水土保持学报, 2008, 22(6): 13—18. Xu S J, Zeng B. Enhancement effects of 5 flooding-tolerant species' roots on soil anti-erodibility in Three Gorges reservoir region (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 13—18

[21] 李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展. 土壤学报, 2008, 45(5): 802—809. Li Z B, Zhu B B, Li P. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 802—809

[22] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. Earth-Science Reviews, 2007, 80: 75—109

[23] 王海锋. 不同季节长期水淹对几种陆生植物的存活、生长和恢复生长的影响. 重庆:西南大学生命科学学院, 2008. Wang H F. The effects of summer and winter long-term submer-

gence on survival, underwater growth and recovery growth of several terrestrial plants (In Chinese). Chongqing: School of Life Science, Southwest University, 2008

[24] 耿浩林, 王玉辉, 王风玉, 等. 恢复状态下羊草(*Leymus chinensis*)草原植被根冠比动态及影响因子. 生态学报, 2008, 28(10): 4 629—4 634. Geng H L, Wang Y H, Wang F Y, et al. The dynamics of root-shoot ratio and its environmental effective factors of recovering *Leymus chinensis* steppe vegetation in Inner Mongolia (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4 629—4 634

[25] 徐炳成, 山仑, 李凤民. 3 种禾草苗期生长和水分利用对土壤水分变化的反应. 西北植物学报, 2007, 27(2): 297—302. Xu B C, Shan L, Li F M. Water changes in soil and water use during seedling growth of three herbaceous grasses (In Chinese). Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(2): 297—302

[26] 张金池, 臧廷亮, 曾锋. 岩质海岸防护林树木根系对土壤抗冲性的强化效应. 南京林业大学学报, 2001, 25(1): 9—12. Zhang J C, Zang T L, Zeng F. A study on soil anti-scouribility intensification of protective forest root system in bedrock coast (In Chinese). Journal of Nanjing Forestry Unversity, 2001, 25(1): 9—12

[27] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895—904. Xiong Y M, Xia H P, Li Z A, et al. Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance: a research review (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 895—904

[28] 朱显谟. 黄土高原地区植被因素对于水土流失的影响. 土壤学报, 1960, 8(2): 110—120. Zhu X M. Impact of vegetation on soil loss (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1960, 8(2): 110—120

[29] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the loess plateau. Pedosphere, 2006, 16(4): 420—427

[30] Wu W D, Zheng S Z, Lu Z H, et al. Effect of plant roots on penetrability and anti-scouribility of red soil derived from Granite. Pedosphere, 2000, 10(2): 183—188

[31] Duŕan Zuazo V H, Rodríguez Pleguezuelo C R, Arroyo Panaderol L, et al. Soil conservation measures in rainfed olive orchards in south-eastern Spain: Impacts of plant strips on soil water dynamics. Pedosphere, 2009, 19(4): 453—464

[32] 李勇, 吴钦孝. 油松人工林根系对土壤抗冲性能的增强效应. 水土保持学报, 1990, 4(1): 1—10. Li Y, Wu Q X. Studies on the intensification of soil anti-scourability by plant roots in the Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(1):1—10

ROOT FEATURES OF SEVERAL FLOODING-TOLERANT PLANTS AND THEIR ROLES IN ENHANCING ANTI-ERODIBILITY OF THE SOIL IN THREE GORGES RESERVOIR REGION

Xu Shaojun Zeng Bo† Lei Shutong Su Xiaolei

(*Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, School of Life Science, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*)

Abstract To investigate characteristics of the root systems of the plants comprising the vegetation in the water-level-fluctuation-zone of the Three Gorges Reservoir Region and their influence on the anti-erodibility of soil, 6 flooding-tolerant plants, i. e. *Cynodon dactylon* (L) Pers., *Alternanthera philoxeroides* (Mart) Griseb, *Triarrhena sacchariflora* Nakai, *Hemarthria compressa* (L. f.) R. Br., *Cyperus rotundus* L., and *Arundinella anomala* Steud, were selected and investigated in the experiment. Root-soil core samplers (Eijkelkamp agrisearch equipment model 15.01) were used to take samples from the fields for analysis, a modified hydraulic flume device was applied to analyze the soil samples for water erosion rate and thereafter obtain anti-erodibility enhancement coefficients of root systems of the 6 plants. Root analysis system (WinRHIZO Pro. 2004c) was used to characterize the root systems. It was found that *Alternanthera philoxeroides* (Mart) Griseb, *Triarrhena sacchariflora* (Maxim.) Nakai, *Cyperus rotundus* L., and *Cynodon dactylon* (L.) Pers. had higher mean root/shoot ratio, while *Arundinella anomala* Steud. and *T sacchariflora* had larger root length density (RLD) and root surface area density (RSAD). Soils containing roots exhibited smaller soil erosion rate obviously. *A. philoxeroides*, *T. sacchariflora* and *A. anomala* had significantly higher anti-erodibility enhancement coefficient (E_c) than the other three plants, with E_c presenting good linear relationship with RLD and RSAD. As to roots of different sizes, roots with $D \leqslant 2$ mm were closely related with soil anti-erodibility, and their RLD and RSAD showed good linear relationship with E_c. This relation got weaker as

the root diameter increased it was demonstrated that all six plants enhanced soil anti-erodibility significantly, in which *A. philoxeroides*, *T. sacchariflora* and *A. anomala* showed much better effect. It is concluded that RLD and RSAD are good indexes to characterize soil anti-erodibility, especially RLD and RSAD of roots with $D \leqslant 2$ mm or $D \leqslant 0.5$ mm.

Key words The water-level-fluctuation-zone; Three Gorges Reservoir Region; Flooding-tolerant plants; Soil anti-erodibility; Root length density; Root surface area density