

DOI: 10.5846/stxb201902220327

简尊吉, 郭泉水, 马凡强, 秦爱丽, 程瑞梅, 肖文发, 康义, 梁洪海. 生态袋护坡技术在三峡水库消落带植被恢复中应用的可行性研究. 生态学报, 2020, 40(21): 7941-7951.

Jian Z J, Guo Q S, Ma F Q, Qin A L, Cheng R M, Xiao W F, Kang Y, Liang H H. Potential of ecological bag slope protection technology in vegetation restoration in the water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7941-7951.

生态袋护坡技术在三峡水库消落带植被恢复中应用的可行性研究

简尊吉¹, 郭泉水^{1,*}, 马凡强¹, 秦爱丽¹, 程瑞梅¹, 肖文发¹, 康义², 梁洪海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 河北省塞罕坝机械林场, 承德 068450

3 重庆市巫山县林业局, 重庆 404700

摘要:通过对三峡水库重庆市巫山县双龙镇和巫峡镇段消落带开展生态袋护坡复绿试验 7 年后, 生态袋上(内)、生态袋堆叠处上方和左侧消落带狗牙根(*Cynodon dactylon*)的种群密度、表型生长性状、地上和地下生物质量, 以及土壤理化性质的测定, 探讨以狗牙根为生态袋上的种植植物, 将生态袋护坡技术用于三峡水库消落带植被恢复的可行性。结果表明: (1) 各试验地生态袋上与其堆叠处上方和左侧消落带的狗牙根种群密度和地上生物质量差异不显著。(2) 狗牙根的表型生长性状和根系生物质量因地和在生态袋堆叠处的方位不同而异。在双龙镇试验地, 生态袋上比其堆叠处上方消落带上狗牙根的植株长度和节间长度低 23.9% 和 22.6% ($P < 0.05$), 除此之外的各项指标差异均不显著; 生态袋内 0—5 cm 土层的根系生物质量比其堆叠处上方消落带增加了 75.7% ($P < 0.05$), 比其堆叠处左侧消落带降低了 11.8%, 在 5—15 cm 各土层降低了 91.6%—96.9% ($P < 0.05$), 15—20 cm 土层的差异不显著。在巫峡镇试验地, 生态袋上与其堆叠处上方和左侧消落带的各表型生长性状的差异均不显著; 生态袋内各土层的根系生物质量均比其堆叠处上方和左侧消落带增加了 20.0%—138.7%。(3) 各试验地生态袋内与其堆叠处上方和左侧消落带土壤容重的差异不显著, 土壤化学性质因地和在生态袋堆叠处的方位不同而异。在双龙镇试验地, 生态袋内的土壤全氮和速效氮含量比其堆叠处上方消落带分别降低了 13.6% 和 40.9% ($P < 0.05$), 比其堆叠处左侧消落带分别降低了 11.9% 和 33.0% ($P < 0.05$); 速效钾含量比其堆叠处上方和左侧消落带分别增加了 18.3% 和 34.1% ($P < 0.05$); 除此之外各指标的差异均不显著。在巫峡镇试验地, 生态袋内的土壤 pH 值和全氮含量比其堆叠处上方消落带分别降低了 1.4% 和 27.9% ($P < 0.05$), 全钾含量增加了 6.1% ($P < 0.05$); 土壤全钾和速效钾含量比生态袋堆叠处左侧消落带分别降低了 8.1% 和 24.9% ($P < 0.05$); 除此之外各指标的差异也不显著。(4) 狗牙根种群密度、大多数生长指标和生物质量与土壤理化指标相关不紧密。总体上, 生态袋上(内)与其堆叠处上方和左侧消落带的大多数表型生长指标, 地上和地下生物质量, 以及土壤理化指标的差异不显著。狗牙根耐淹、抗旱、耐贫瘠, 根系发达, 且穿透力强, 能够在生态袋上正常生长; 生态袋透水不透土, 且具有一定的保肥能力。因此, 以狗牙根为生态袋上的种植植物, 将生态袋护坡技术用于三峡水库消落带植被恢复具有一定的可行性。

关键词: 三峡水库; 消落带; 植被恢复; 生态袋护坡技术; 狗牙根

Potential of ecological bag slope protection technology in vegetation restoration in the water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir

JIAN Zunji¹, GUO Quanshui^{1,*}, MA Fanqiang¹, QIN Aili¹, CHENG Ruimei¹, XIAO Wenfa¹, KANG Yi², LIANG Honghai³

1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B040301)

收稿日期: 2019-02-20; 网络出版日期: 2020-09-02

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

national Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

2 Saihanba Mechanized Forest Farm of Hebei, Chengde 068450, China

3 Wushan Bureau of Forestry, Chongqing 404700, China

Abstract: Vegetation restoration in the water level fluctuation zone (WLFZ) is vital for maintaining the health and stability of the Three Gorges Reservoir. Many technical methods (i.e. planted species and concrete-engineered methods) of vegetation restoration were performed in this zone. However, these methods are not suitable for the WLFZ with repeated collapse and soil erosion. To evaluate the potential of ecological-bag (eco-bag) slope protection technology, an effective method for slope fixation and re-greening in various environments, population characteristics (density, morphological traits and biomass) of *Cynodon dactylon*, and physicochemical indicators of soil on/in the eco-bag and around the eco-bag stacking (upper and left sides) at two plots (Shuanglong and Wuxia) in Wushan County of Chongqing Municipality were investigated after 7-year of experimental setup. The results showed that population density and aboveground biomass at two plots were no significant differences between on the eco-bag and around the eco-bag stacking. However, morphological traits and root biomass varied with different plots and positions. In Shuanglong plot, length and inter-node length of *C. dactylon* on the eco-bag decreased by 23.9% and 22.6% than those around the upper side of the eco-bag stacking, respectively ($P < 0.05$). Root biomass of 0—5 cm in the eco-bag was 75.7% more than around the upper side of the eco-bag stacking ($P < 0.05$), while was 11.8% lower than around the left side of the eco-bag stacking. And root biomass of 5—15 cm in the eco-bag were lower than around the eco-bag stacking, with proportion of 91.6%—96.9%. In Wuxia plot, root biomass of 0—20 cm in the eco-bag increased by 20.0%—138.7% than around the eco-bag stacking, while there were no significant differences in morphological traits and aboveground biomass. Additionally, soil chemical indicators also changed with different plots and positions. In Shuanglong plot, soil total nitrogen and available nitrogen in eco-bag was significantly lower than that around the eco-bag stacking, with proportion of 11.9%—40.9%; while soil available potassium increased by 18.3% (upper side) and 34.1% (left side), respectively ($P < 0.05$). In Wuxia plot, soil pH and total nitrogen in the eco-bag decreased by 1.4% and 27.9% than around the upper side of the eco-bag stacking, respectively, but total potassium increased by 6.1% ($P < 0.05$); soil total potassium and available potassium were 8.1% and 24.9% lower than around the left side of the eco-bag stacking, respectively ($P < 0.05$). Further, not all significant relationships were found between population density, morphological traits, above- and underground biomass and soil physicochemical indicators. In total, population characteristics of *C. dactylon* and physicochemical indicators of soil had no obvious differences between on/in the eco-bag and around the eco-bag stacking. *C. dactylon*, one of species with resistance to flood, drought and poor fertility, had stronger root and grew well on the eco-bag. On the other hand, eco-bag is permeable to water but no to soil, implying some retention ability for fertility. Thus, eco-bag slope protection technology has huge potential for vegetation restoration in the WLFZ of the Three Gorges Reservoir.

Key Words: Three Gorges Reservoir; water level fluctuation zone; vegetation restoration; ecological bag slope protection; *Cynodon dactylon*

三峡水库消落带总面积 348.93 km², 冬季最高蓄水位海拔 175 m, 夏季最低保持水位海拔 145 m, 相对高差 30 m, 是目前我国最大的水库消落带, 也是三峡水库最不稳定的生态脆弱带^[1-3]。自 2003 年三峡水库运行以来, 受周期性水库水位涨落的影响, 消落带植被已遭到严重破坏^[4-7]。在一些坡度较大, 土壤冲刷严重的地段, 消落带植被已不复存在, 并开始出现与三峡优美环境不协调的似“荒漠化”景观^[3]。因此, 恢复消落带植被, 已成为当前三峡水库生态环境治理的重要任务之一。

近年来, 围绕消落带植被恢复, 许多专家和学者从稳固消落带边坡和筛选适生植物入手, 开展了大量理论探讨和试验研究, 并开发了一些卓有成效的恢复方法。任雪梅等^[8]和汤显强等^[9]从理论上探讨了在三峡水

库消落带的土质缓坡上构建植被生态工程的可能性;吴江涛等^[10]提出了在岩石坡面构造的燕窝式植生穴内和在裸地边坡铺砌的防冲刷生态型护坡构件上,种植耐水淹的灌木和挺水植物的植被恢复技术;鲍玉海等^[11]和钟荣华等^[12]提出了依靠钢筋相互串联和构件体自嵌衔接铰链式覆盖消落带坡面,在砖体种植穴中种植耐湿植物的自锁定消浪植生型生态护坡技术和串珠式柔性护岸技术;周明涛等^[13]验证了植物与工程(混凝土菱形框格梁)相结合的治理模式在三峡水库消落带应用的可行性。目前,这些技术在三峡水库消落带植被恢复实践中已有应用,但推广范围有限。其原因可能与混凝土、钢筋等建筑材料的大量使用,以及施工难度大、成本高,或植被恢复效果不甚理想有关。生态袋护坡技术是集柔性结构、生态、环保、节能四位一体的一种新型生物工程技术。它通过将生态袋沿破损边坡层层堆叠,袋体间用专用联结扣联结,在生态袋上种植植物来实现稳固边坡和复绿的目标^[14-15]。生态袋是由聚丙烯或聚酯纤维材料制成的双面熨烫针刺无纺布加工而成,具有透水不透土、耐酸碱、不助燃、零污染、抗老化、使用寿命可达 70 年之久等优点^[14-15]。生态袋内的填充物可就地取材,成本低廉,施工便捷。与现有技术比较^[8-13],采用生态袋护坡技术不仅可有效避免高能源消耗和高污染建筑材料的过多使用,还可彻底解决植物生长基质因涌浪冲刷而流失的问题^[14-15]。近十几年来,生态袋护坡技术已在堤防工程和道路边坡绿化等领域广泛应用^[15-22],但在三峡水库消落带植被恢复中的应用还鲜见报道。

生态袋、填充物、生态袋上种植的植物是生态袋护坡技术的 3 个重要元素。实现生态袋护坡复绿功能的核心是适生植物选择,基本保障是生态袋的使用寿命和填充物肥力的持久供应^[22]。三峡水库消落带水陆生境交替变化,生态袋上种植的植物不仅要具备耐淹和耐旱双重特性,而且其根系要有较强的穿透能力;同时,生态袋内的土壤养分也不能因水库水位涨落过程中的反复淋溶而发生过多流失。这些都是制约生态袋护坡技术在三峡水库消落带植被恢复中应用的关键因素。

本文以 2009 年 5 月在三峡水库重庆市巫山县双龙镇段消落带(简称双龙镇试验地)和巫峡镇段消落带(简称巫峡镇试验地)设置的生态袋护坡和复绿试验示范基地为依托,于 2016 年 8 月,对生态袋上(内)和其堆叠处上方和左侧消落带狗牙根(*Cynodon dactylon*)种群密度、表型生长性状、地上和地下生物质量,以及土壤理化性质进行测定和分析,试图回答两个科学问题:(1)生态袋上与其堆叠处周边消落带狗牙根的种群密度、表型生长性状和生物质量是否存在差异?(2)生态袋内与其堆叠处周边消落带的土壤养分含量有何异同?并以此为基础,对以狗牙根为种植植物,将生态袋护坡技术应用于三峡水库消落带植被恢复的可行性进行分析。

1 试验地概况

试验地设在三峡水库重庆市巫山县双龙镇和巫峡镇段消落带内。地理位置和调查样方设置见图 1。双龙镇试验地设在三峡水库大宁河支线,地理坐标为 31°11′25.0″N,109°52′15.4″E,海拔 155 m 左右,坡度 26°,坡向为北偏东 30°。试验前为农用梯田,土层厚度 40 cm 左右,土壤类型为在紫色砂岩上发育的紫色土。巫峡镇试验地设在三峡水库干线沿岸,地理坐标为 31°04′17.8″N,109°55′44.4″E,海拔 160 m 左右,坡度 40°,坡向为南偏东 20°。试验前为坡耕地,土层厚度 60 cm 左右,土壤类型为在石灰岩上发育的黄色石灰土。两地气候类型相同,均属于亚热带季风性湿润气候。年均温 18.4℃,≥10℃年积温 5857.0℃,无霜期 305 d,年均降雨量 1049.3 mm^[23-24]。

在双龙镇试验地,生态袋护坡技术应用在上下两块梯田交汇处的垂直界面上。试验前,该界面上的土壤因水库涌浪冲刷殆尽,植被全无。试验设置的生态袋堆叠长度为 50 m,高度 1 m。在巫峡镇试验地,生态袋护坡技术应用在消落带崩塌地段,生态袋堆叠面积 200 m²。试验前,生态袋堆叠处周边消落带已被狗牙根单优种群所覆盖,盖度接近 100%,且长势良好。

2 研究方法

2.1 生态袋护坡施工和植物种植

生态袋购于广东东莞金字塔绿色科技有限公司。规格为 114 cm×51 cm。填充土壤后,长约 94 cm,宽约

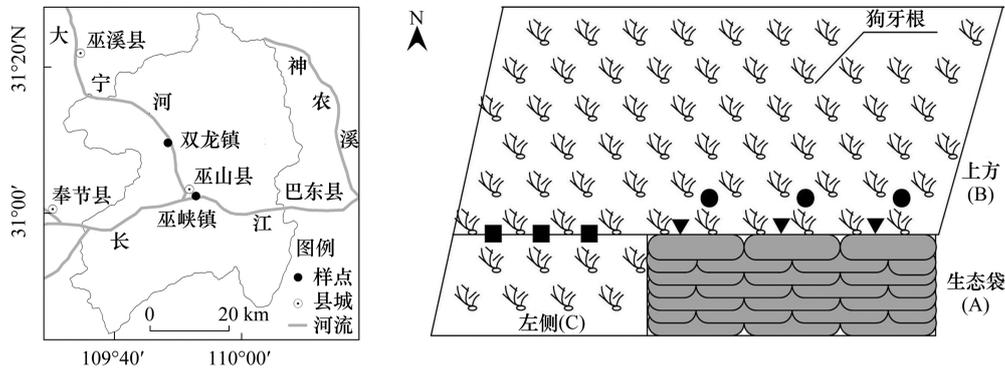


图1 三峡水库消落带生态袋护坡试验地位置和示意图

Fig.1 Location and schematic diagram of the ecological bag slope protection in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

图中倒三角、实心圆和正方形分别代表生态袋上(位置 A)、生态袋堆叠处上方(位置 B)和生态袋堆叠处左侧(位置 C)

42 cm, 厚约 20 cm。袋内填充的土壤取自试验地附近的弃耕地, 土壤理化性质见表 1。生态袋填充土壤后, 用生态袋专用扎口带扎口, 而后沿边坡自下而上按“品”字形堆叠(图 1)。袋体间用生态袋专用联结扣联结。堆叠完成后, 用平铲从试验地附近弃耕地上生长的狗牙根种群中铲取厚度约 5 cm 左右的带根草皮, 平铺在生态袋的表面和嵌入袋与袋之间的缝隙中; 之后, 每隔 1 天浇 1 次水, 以保持狗牙根草皮处于湿润状态。当狗牙根萌出新芽(约 7 d 左右), 停止浇水, 任其自然生长。生态袋护坡施工和植物种植时间为 2009 年 5 月。

表 1 双龙镇和巫峡镇试验地土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in the Shuanglong and Wuxia plots

指标 Indicator	双龙	巫峡	指标 Indicator	双龙	巫峡
容重 Bulk density/(g/cm ³)	1.41	1.50	全钾 Total potassium/(g/kg)	15.62	6.38
pH	7.89	7.87	速效氮 Available nitrogen/(mg/kg)	81.09	54.47
有机质 Organic matter/(g/kg)	24.32	15.22	有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	55.53	0.96
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	1.09	0.89	速效钾 Available potassium/(mg/kg)	73.47	114.57
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	0.57	0.60			

表中数据来自文献^[23-24]

2.2 狗牙根种群密度、表型生长性状和生物质量调查

调查时间为 2016 年 8 月。调查方法采用样方法和土柱挖掘法。样方调查内容主要是种群密度和表型生长性状。样方大小 40 cm×40 cm。每块试验地设 9 个(图 1)。其中, 3 个样方设在生态袋上(位置 A), 3 个样方设在其堆叠处上方消落带上(位置 B), 3 个样方设在其堆叠处左侧消落带上(位置 C)。调查时, 先查数样方内狗牙根的植株数量(以地面或生态袋表面萌生的植株为单元), 再随机抽取 15 株, 用钢卷尺和游标卡尺测量每个植株的长度、基径、节间长度、一级分枝长度和一级分枝节间长度(精度: 0.01), 同时, 查数各植株的节间数量、一级分支数量和一级分枝节间数量。调查完成后, 割取植株地上部分, 装入布袋; 而后向下挖取长、宽、深为 40 cm×40 cm×20 cm 的土柱^[23]进行根系生物质量调查。调查时, 先按 0—5、5—10、10—15、15—20 cm 分层, 而后用锋利的钢刀分层切割, 并分别放入盆中用清水浸泡, 待土壤松软后, 用清水将附着在根系上的土壤冲洗干净, 装入布袋。在实验室内, 将所有植物样品一并置入温度设置为 70℃ 的鼓风干燥箱中进行烘干处理。烘至 48 h 后, 用 1/100 电子天平称其干质量。

2.3 土壤理化性质测定

土壤容重和化学性质测定。取土位置设在土柱挖取后形成的空穴边缘(0—20 cm 土层)。每个样方取 1 个环刀土样(100 cm³) 和 1 个混合土样(约 1 kg)。土样采集后带回实验室自然风干, 剔除砾石、植物根系等杂

物,用研钵研磨,过 2 mm 和 0.154 mm 网筛,而后装入信封备用。测定指标包括:容重、全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷、速效钾、有机质和 pH 值。测定方法参照《森林土壤分析方法》^[25]。其中,全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法,全磷和全钾含量测定采用硝酸、高氯酸和氢氟酸混合溶液消解—等离子发射光谱法,速效氮含量测定采用碱解—扩散法,有效磷含量测定采用盐酸和硫酸混合溶液浸提—等离子发射光谱法,速效钾含量测定采用乙酸铵溶液浸提—等离子发射光谱法,有机质含量测定采用重铬酸钾氧化外加加热法,pH 值测定采用 1:2.5(v:v)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。

2.4 数据分析

采用 SPSS 19.0 软件的单因素方差分析(one-way ANOVA)中的 Duncan 法对生态袋上(内)与其堆叠处周边狗牙根的种群密度、生长特征和土壤理化指标进行差异显著性检验($\alpha=0.05$);采用 Pearson 法对狗牙根种群特征与土壤理化指标进行相关性分析。采用 Origin 9.0 软件作图。数据整理用 Excel 2003。图表中数据为均值 \pm 标准差。

3 结果与分析

3.1 生态袋上与其堆叠处不同方位消落带上狗牙根种群密度的比较

由图 2 可以看出,各试验地生态袋上(位置 A)与其堆叠处上方(位置 B)和左侧(位置 C)消落带狗牙根种群密度的差异不显著($P>0.05$)。种群密度的高低因地和在生态袋堆叠处的方位不同而变化。在双龙镇试验地为生态袋堆叠处左侧消落带>生态袋堆叠处上方消落带>生态袋上;在巫峡镇试验地为生态袋上>生态袋堆叠处左侧消落带>生态袋堆叠处上方消落带。

3.2 生态袋上与其堆叠处不同方位消落带上狗牙根表型生长性状的比较

生态袋上(位置 A)与其堆叠处上方(位置 B)和左侧(位置 C)消落带狗牙根的表型生长性状因地而异(表 2)。在巫峡镇试验地,生态袋上与生态袋堆叠处上方和左侧消落带各项表型生长指标的差异均不显著。在双龙镇试验地,生态袋上与其堆叠处左侧消落带各表型生长指标的差异也不显著,但比其堆叠处上方消落带的植株长度和节间长度分别降低了 23.9%和 22.6%($P<0.05$),除此之外的其他指标的差异均不显著。

3.3 生态袋上(内)与其堆叠处不同方位消落带上狗牙根生物质量的比较

各试验地生态袋上(位置 A)与其堆叠处上方(位置 B)和左侧(位置 C)消落带狗牙根地上生物质量的差异均不显著,地下生物质量则因地和土层不同而异(图 3)。在双龙镇试验地,生态袋内 0—5 cm 土层中狗牙根的根系生物质量比其堆叠处上方消落带增加了 75.7%($P<0.05$),但比其堆叠处左侧消落带降低了 11.8%;在 5—10 cm 和 10—15 cm 土层中,生态袋内比其堆叠处上方和左侧消落带降低了 91.6%—96.9%($P<0.05$);在 15—20 cm 土层中的差异不显著。在巫峡镇试验地,生态袋内 0—5 cm 土层中的根系生物质量比其堆叠处上方和左侧消落带增加了 138.7%和 98.8%($P<0.05$);在 5—10 cm、10—20 cm 和 15—20 cm 土层中,生态袋内比其堆叠处上方和侧方消落带增加了 20.0%—136.3%($P>0.05$)。

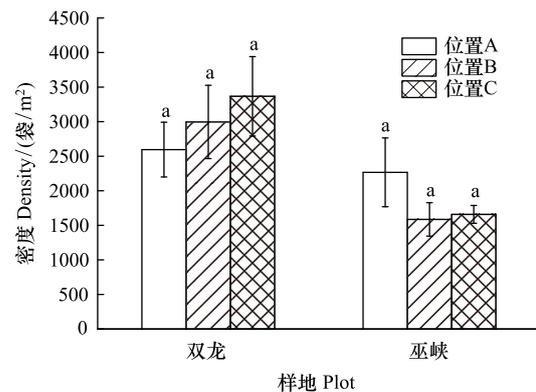


图 2 生态袋上(位置 A)与其堆叠处上方(位置 B)和左侧(位置 C)消落带上狗牙根的种群密度

Fig.2 Population density of *Cynodon dactylon* on the ecological bag (position A) and around the ecological bag stacking (position B and position C) at the same plot

不同小写字母表示不同生态袋位置间在 0.05 水平下差异显著

表 2 生态袋上(位置 A)与其堆叠处上方(位置 B)和左侧(位置 C)消落带上狗牙根的表型生长性状

Table 2 Morphological indicators of *Cynodon dactylon* on the ecological bag (position A) and around the ecological bag stacking (position B and position C) at the same plot

指标 Indicator	双龙			巫峡		
	位置 A Position A	位置 B Position B	位置 C Position C	位置 A Position A	位置 B Position B	位置 C Position C
植株长度 Length/cm	21.30±2.4b	28.0±2.6a	21.3±1.7b	21.7±1.1a	26.7±1.2a	25.6±9.9a
基径 Basal diameter/mm	1.17±0.18a	1.02±0.04a	1.24±0.10a	1.08±0.07a	1.13±0.06a	1.17±0.06a
节间数量 Node number	8.20±0.9a	8.5±1.1a	7.9±0.8a	12.3±0.3a	12.1±0.4a	11.8±1.5a
节间长度 Length of node/cm	2.40±0.2b	3.1±0.4a	2.5±0.2b	1.8±0.1a	2.3±0.1a	2.1±0.9a
一级分枝数量 Number of primary branch	2.50±0.1a	3.2±1.0a	3.0±0.7a	1.5±0.5a	1.5±0.7a	1.3±0.3a
一级分枝长度 Length of primary branch/cm	5.90±2.2a	7.7±1.0a	5.3±1.4a	7.4±2.4a	5.7±0.4a	6.0±3.0a
一级分枝节间数量 Number of primary branch node	3.40±0.9a	7.3±3.5a	4.0±0.8a	5.9±1.5a	5.0±0.7a	4.9±1.4a
一级分枝节间长度 Length of primary branch node/cm	1.60±0.2ab	1.8±0.2a	1.4±0.3b	1.3±0.2a	1.3±0.1a	1.2±0.3a

同行不同小写字母表示不同生态袋位置间在 0.05 水平下差异显著

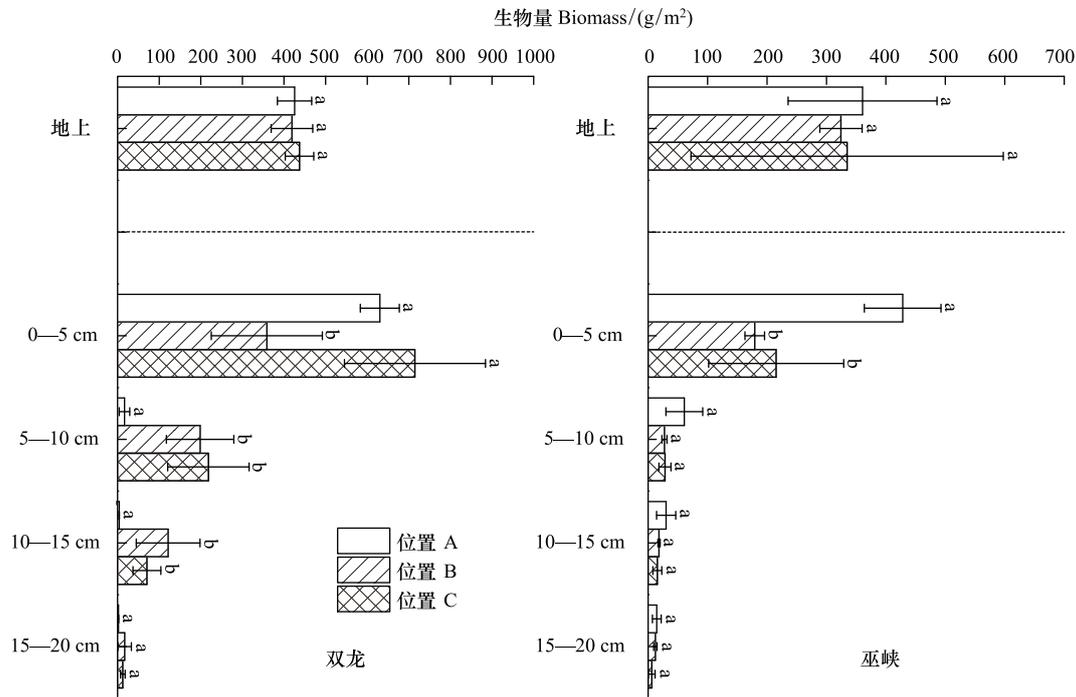


图 3 生态袋上(内,位置 A)与其堆叠处上方(位置 B)和左侧(位置 C)消落带上狗牙根的生物质量

Fig.3 Biomass of *Cynodon dactylon* on/in the ecological bag (position A) and around the ecological bag stacking (position B and position C) at the same plot

不同小写字母表示不同生态袋位置间在 0.05 水平下差异显著

3.4 生态袋内与其堆叠处不同方位消落带上土壤理化性质的比较

各试验地生态袋内(位置 A)与其堆叠处上方(位置 B)和左侧(位置 C)消落带土壤容重的差异均不显著,土壤化学性质因地而异(图 4)。在双龙镇试验地,生态袋内比其堆叠处上方消落带土壤全氮和速效氮含量降低了 13.6%和 40.9% ($P<0.05$),速效钾含量增加了 18.3% ($P<0.05$);生态袋内的全氮和速效氮含量比其

堆叠处左侧消落带降低了 11.9% 和 33.0% ($P < 0.05$), 速效钾含量增加了 34.1% ($P < 0.05$); 除此之外, 其他各项指标的差异均不显著。在巫峡镇试验地, 生态袋内土壤 pH 值和全氮含量比其堆叠处上方消落带分别降低了 1.4% 和 27.9% ($P < 0.05$), 全钾含量增加了 6.1% ($P < 0.05$); 生态袋内比其堆叠处左侧消落带的全钾和速效钾含量分别降低了 8.1% 和 24.9% ($P < 0.05$)。

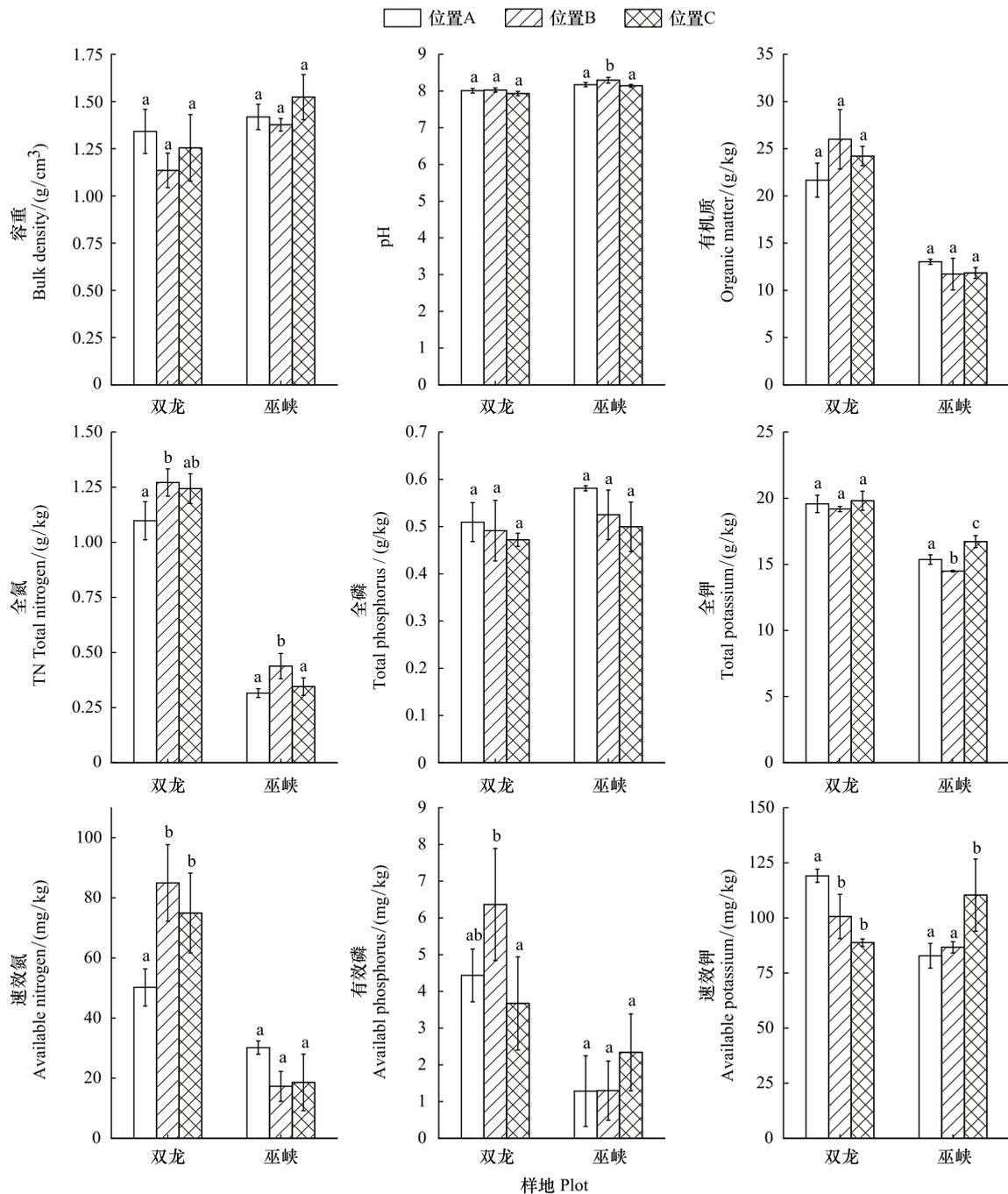


图4 生态袋内(位置A)与其堆叠处上方(位置B)和左侧(位置C)消落带土壤的理化指标

Fig.4 Soil physical and chemical indicators in the ecological bag (position A) and around the ecological bag stacking (position B and position C) at the same plot

不同小写字母表示不同生态袋位置间在 0.05 水平下差异显著

3.5 狗牙根种群特征与土壤理化指标的相关性分析

从表 3 可知,狗牙根种群的大多数测定指标与土壤理化指标的 Pearson 相关性未达到显著水平,相关性显著的很少,且因地而异。在双龙镇试验地,土壤容重与植株节间长度和一级分枝节间长度,全钾含量与植株长度,有效磷含量与 0—5 cm 土层中的根系干质量,速效钾含量与种群密度呈显著负相关($P < 0.05$);有机质含量与 10—15 cm 土层中的根系干质量,全氮含量与 5—10 cm 土层和 10—15 cm 土层中的根系干质量,速效氮含量与植株节间长度和 5—10 cm 及 10—15 cm 土层中的根系干质量,有效磷含量与植株长度、植株节间长度、一级分枝节间长度呈显著正相关($P < 0.05$)。在巫峡镇试验地,速效氮含量与植株节间数量显著正相关($P < 0.05$),土壤容重与 15—20 cm 土层中的根系干质量,有效磷含量与一级分枝节间长度显著负相关($P < 0.05$)。

4 讨论

消落带的土壤存在与否,是制约三峡水库消落带植被恢复的瓶颈。受多年水库水位涨落或涌浪冲刷的影响,消落带的土壤流失问题已非常严重。在一些坡度较大、土层较薄的地段,其表层土壤已丧失殆尽;在一些土层较厚的地段,滑坡和崩塌都有发生^[3]。土壤是植物生存的基础,没有土壤,植被就不可能恢复。生态袋透水不透土,将生态袋堆叠在消落带上,就等于在其地表铺垫了一层厚厚的可永久保存的土壤,从而使植被恢复所需土壤缺失的问题得以解决。

稳固边坡和复绿是生态袋护坡技术追求的两个目标^[14-15]。在各目标的实现过程中,所遇到的问题不尽相同。复绿目标能否实现,关键在于所选择的种植植物是否与当地环境相适应,能否在生态袋上正常生长。三峡水库消落带生态环境特殊,种植在生态袋上的植物,不仅要具备耐淹、抗旱双重特性,而且其根系还要有较强的穿透力,能够穿过生态袋汲取袋内土壤养分和水分。本研究以狗牙根为生态袋上的种植植物,在试验 7 年后的调查结果显示,生态袋上(内)与其堆叠处周边消落带上的狗牙根种群密度和地上生物质量,以及大多数表型生长指标和地下生物质量的差异不显著(图 2 和图 3,表 2)。此结果表明,狗牙根不仅能够适应三峡水库消落带水陆交替变化的生境,而且能够在生态袋上正常生长。狗牙根属多年生匍匐茎草本植物,一旦种植成活,便可迅速蔓延^[23],很快就将生态袋全部覆盖。试验发现,在生态袋上种植当年,其覆盖率就达到了 100%,在此之后的 7 年间,一直未发生改变。狗牙根是广布于三峡水库消落带的乡土植物^[4-7]。已有研究表明^[23,26-31],能够在干湿交替逆境中降低代谢和提高储能,以及积极的自我调节和光合补偿能力,是狗牙根能够在消落带和生态袋上长期生存的重要生理机制。

在不同试验地,生态袋上(内)与其堆叠处上方和左侧消落带的狗牙根少数表型生长性状和地下根系生物质量存在差异(表 2 和图 3)的原因,可能与试验地的地形条件,以及由此导致的生态袋堆叠后拦截其上方消落带冲刷下来的或水体携带的泥沙(淤泥)厚度有关。已有研究表明,受泥沙(淤泥)沉积或掩埋(厚度约 0—10 cm)影响,狗牙根的出苗率或萌芽能力会显著降低^[32-33]。但泥沙(淤泥)中的养分较高,对狗牙根的茎发育、叶伸长以及茎节、叶片的形成有一定的促进作用^[32]。据观察,生态袋堆叠后,生态袋上和其堆叠处上方消落带都会沉积一层厚薄不等的泥沙(淤泥)。相比较而言,地势较平坦(坡度 26°)的双龙镇试验地生态袋堆叠处上方消落带的泥沙(淤泥)沉积较厚(1—5 cm),而坡度较大(坡度 40°)的巫峡镇试验地上则沉积较薄。这可能是导致双龙镇试验地生态袋堆叠处上方消落带狗牙根种群密度低于其堆叠处左侧消落带(图 2),但有些表型生长性状和根系生物质量高于生态袋上和其堆叠处左侧消落带(表 2 和图 3),以及巫峡镇试验地生态袋上与其堆叠处上方和左侧消落带狗牙根的种群密度、表型生长性状和根系生物质量无显著差异(图 2 和图 3,表 2)的主要原因。

生态袋上和其堆叠处上方和左侧消落带上狗牙根的根系生物质量在土层中的分配基本一致,主要集中在 0—10 cm 土层(图 3)。这与许多研究结果相一致^[34-36]。野外调查发现,狗牙根的垂直根系能从一个生态袋进入另一个生态袋,也能穿出生态袋扎根于袋外的土壤中。生态袋内与其堆叠处上方和左侧消落带土壤容重

表 3 不同样地狗牙根种群特征与土壤理化指标间的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between the population characteristics of *Cynodon dactylon* and physical-chemical properties of soil in different plots

样地 Plot	指标 Indicator	种群密度 PD	植株长度 L	基径 BD	节间数量 NN	节间长度 LN	一级分 枝数量 NPB	一级分 枝长度 LPB	一级分 枝间数量 NPBN	一级分枝 节间长度 LPBN	地上部分 干质量 AB	0—5 cm		5—10 cm		10—15 cm		15—20 cm	
												土层 干质量 B of 0—5 cm	土层 干质量 B of 5—10 cm	土层 干质量 B of 10—15 cm	土层 干质量 B of 15—20 cm				
双龙	容重 Bd	-0.337	-0.393	0.143	0.497	-0.751*	-0.367	-0.449	-0.240	-0.733*	-0.022	0.210	-0.242	-0.507	-0.228				
	pH	0.009	0.233	-0.270	0.180	0.166	0.178	0.325	0.517	0.555	-0.015	-0.123	-0.486	-0.143	0.250				
	有机质 OM	0.128	0.269	-0.197	-0.487	0.650	0.002	0.346	0.050	0.406	-0.350	-0.466	0.646	0.862*	0.491				
	全氮 TN	0.240	0.160	-0.175	-0.238	0.520	0.061	0.187	0.187	0.150	-0.453	-0.413	0.757*	0.752*	0.496				
	全磷 TP	-0.638	-0.073	0.202	-0.395	0.333	-0.384	0.398	0.398	0.401	-0.249	-0.279	-0.110	0.031	-0.574				
	全钾 TK	0.318	-0.699*	0.213	-0.166	-0.546	-0.163	-0.441	-0.226	-0.446	-0.320	0.483	-0.130	-0.275	0.097				
	速效氮 AN	0.250	0.580	-0.230	-0.194	0.763*	0.305	0.357	0.222	0.364	-0.019	-0.471	0.751*	0.799*	0.338				
	有效磷 AP	-0.234	0.799**	-0.464	-0.003	0.862**	0.264	0.546	0.356	0.758*	0.057	-0.700*	0.154	0.385	-0.176				
	速效钾 AK	-0.763*	-0.143	-0.077	-0.081	-0.138	-0.558	0.174	-0.389	0.201	-0.293	-0.228	-0.600	-0.308	-0.564				
	容重 Bd	-0.455	-0.512	0.590	-0.185	-0.528	-0.225	-0.283	-0.308	-0.539	-0.291	-0.171	-0.394	-0.511	-0.723*				
巫峡	pH	-0.302	0.144	0.201	0.245	0.121	0.058	0.040	0.210	0.278	-0.115	-0.287	-0.226	-0.134	0.018				
	有机质 OM	0.024	-0.482	0.213	0.419	-0.515	0.597	-0.009	0.283	0.120	-0.218	0.453	0.259	0.156	0.086				
	全氮 TN	-0.293	0.412	0.348	0.336	0.374	0.324	-0.235	-0.141	0.425	-0.106	-0.588	-0.512	-0.400	-0.060				
	全磷 TP	0.525	0.177	-0.480	0.340	0.119	-0.071	0.499	0.400	0.352	0.303	0.592	0.552	0.497	0.411				
	全钾 TK	-0.185	-0.223	0.502	-0.173	-0.256	-0.223	-0.075	-0.133	-0.421	-0.099	-0.015	-0.161	-0.289	-0.602				
	速效氮 AN	0.133	-0.230	-0.086	0.730*	-0.368	0.488	0.015	0.124	0.133	-0.222	0.479	0.494	0.319	0.200				
	有效磷 AP	-0.657	-0.339	0.397	-0.118	-0.392	-0.181	-0.311	-0.246	-0.767*	-0.517	-0.321	-0.051	-0.134	-0.442				
	速效钾 AK	0.172	0.380	0.214	-0.582	0.464	-0.347	0.214	0.131	-0.036	0.374	-0.114	-0.168	-0.096	-0.218				

PD: Population density; L: Length; BD: Basal diameter; NN: Number of node; LN: Length of node; NPB: Number of primary branch; LPB: Length of primary branch; NPBN: Number of primary branch node; LPBN: Length of primary branch node; AB: Aboveground biomass; B of 0—5 cm: Biomass of 0—5 cm soil layer; B of 5—10 cm: Biomass of 5—10 cm soil layer; B of 10—15 cm: Biomass of 10—15 cm soil layer; B of 15—20 cm: Biomass of 15—20 cm soil layer; Bd: Bulk density; OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; AN: Available nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

的差异不显著,大多数土壤化学指标的差异也不显著(图4),表明生态袋内的土壤,虽然经历了多年水库水体的淋溶,但仍具有较高的土壤肥力。

狗牙根种群密度、大多数表型生长指标和生物质量指标与土壤理化指标的相关性不显著,少数指标相关显著,且因地而异(表3)。相比较而言,在土壤肥力较高(表1,图4)的双龙镇试验地,显著相关的指标较多,表明,狗牙根具有喜肥性,肥沃的土壤对狗牙根的生长发育有促进作用^[31, 37];在土壤肥力较低的巫峡镇试验地,显著相关的指标较少。结合狗牙根在生态袋上与其堆叠处上方和左侧消落带表现生长指标和根系生物质量差异不显著的结果(表2,图3)分析可知,狗牙根对贫瘠的土壤也有较强适应性。已有研究表明^[37],狗牙根能够在富养和贫瘠的土壤中均能保持较高的养分竞争力。这可能是狗牙根种群密度、大多数表型生长指标和根系生物质量与土壤理化指标相关不显著(表3)的重要原因之一。

5 结论

(1)生态袋上与其堆叠处上方和左侧消落带的狗牙根种群密度和地上部分的生物质量,以及大多数表型生长性状和地下生物质量的差异不显著;生态袋内大多数土壤理化指标与其堆叠处上方和左侧消落带的差异也不显著。

(2)狗牙根种群密度、大多数表型生长指标和生物质量指标与土壤理化指标的相关性不显著。

(3)狗牙根为广布于三峡水库消落带的多年生匍匐茎草本植物,具有节节生根的生物学特性和耐淹、抗旱、耐贫瘠等生态学特性。其根系发达,能够穿透生态袋,汲取袋内的土壤养分和水分;在生态袋上种植成活后,便可迅速蔓延,将生态袋全部覆盖。生态袋透水不透土,可确保植物生长基质不因三峡水库水位涨落和涌浪冲击而流失,且具有一定的保肥能力。因此,以狗牙根为生态袋上的种植植物,将生态袋护坡技术用于三峡水库消落带植被恢复具有一定的可行性。

参考文献(References):

- [1] New T, Xie Z Q. Impacts of large dams on riparian vegetation: applying global experience to the case of China's Three Gorges Dam. *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17(13): 3149-3163.
- [2] Fu B J, Wu B F, Lü Y H, Xu Z H, Cao J H, Niu D, Yang G S, Zhou Y M. Three Gorges Project: efforts and challenges for the environment. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2010, 34(6): 741-754.
- [3] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir — A unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [4] Yang F, Liu W W, Wang J, Liao L, Wang Y. Riparian vegetation's responses to the new hydrological regimes from the Three Gorges Project: clues to revegetation in reservoir water-level-fluctuation zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 89-98.
- [5] 郭泉水, 康义, 洪明, 金江群, 朱妮妮, 聂必红, 王佐庆. 三峡库区消落带陆生植被对首次水陆生境变化的响应. *林业科学*, 2013, 49(5): 1-9.
- [6] 朱妮妮, 郭泉水, 秦爱丽, 裴顺祥, 马凡强, 朱莉, 简尊吉. 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*, 2015, 35(23): 7852-7867.
- [7] Jian Z J, Ma F Q, Guo Q S, Qin A L, Xiao W F. Long-term responses of riparian plants' composition to water level fluctuation in China's Three Gorges Reservoir. *PLoS ONE*, 2018, 13(11): e0207689.
- [8] 任雪梅, 杨达源, 徐永辉, 周彬. 三峡库区消落带的植被生态工程. *水土保持通报*, 2006, 26(1): 42-43, 49-49.
- [9] 汤显强, 吴敏, 金峰. 三峡库区消落带植被恢复重建模式探讨. *长江科学院院报*, 2012, 29(3): 13-17.
- [10] 吴江涛, 许文年, 陈芳清, 戴方喜, 郑江英. 库区消落带植被生境构筑技术初探. *中国水土保持*, 2007, (1): 27-30.
- [11] 鲍玉海, 唐强, 高银超. 水库消落带消浪植生型生态护坡技术应用. *中国水土保持*, 2010, (10): 37-39.
- [12] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 唐强, 胡云华, 高进长, 阎丹丹. 水库消落带串珠式柔性护岸技术及其在应用. *世界科技研究与发展*, 2015, 37(1): 1-4.
- [13] 周明涛, 杨平, 许文年, 肖海. 三峡库区消落带植物治理措施. *中国水土保持科学*, 2012, 10(4): 90-94.
- [14] 崔丽娟, 李伟, 赵欣胜, 张曼胤, 王义飞, 张岩, 李胜男. 湿地岸坡恢复技术研究. *世界林业研究*, 2011, 24(3): 16-21.
- [15] 张丹丹, 史常青, 王冬梅. 河岸带生态护坡技术研究与应用. *湖南农业科学*, 2013, (11): 28-31.

- [16] 许兴,程炜.生态袋技术在湖岸修复中的应用.北京园林,2011,28(3):29-33.
- [17] 王英宇,宋桂龙,韩烈宝,孟强.高速公路不同结构岩石边坡生态防护对策与植被恢复技术选择.中国水土保持,2012,(10):29-32.
- [18] 张华,赵廷宁,白麟,张成梁,韩雪梅,许宗文,冯明明.采石场松散体坡面平铺生态袋绿化的水土保持效应.水土保持通报,2013,33(2):111-115.
- [19] 崔丹娜,张显国,成克武,温静,黄大庄.高速公路边坡植被重建过程中群落组成特征.水土保持通报,2015,35(5):257-261.
- [20] 荣浩,珊丹,刘艳萍,梁占岐.草原工程侵蚀区植被恢复模式的水土保持效应.水土保持研究,2017,24(3):24-28.
- [21] 韩煜,赵廷宁,陈琳,柳立兵.坡面植被恢复试验示范区植被群落特征初步研究.水土保持研究,2010,17(4):188-194.
- [22] 夏继红,严忠民.浅论城市河道的生态护坡.中国水土保持,2003,(3):9-10.
- [23] 洪明,郭泉水,聂必红,康义,裴顺祥,金江群,王祥福.三峡库区消落带狗牙根种群对水陆生境变化的响应.应用生态学报,2011,22(11):2829-2835.
- [24] 郭泉水,洪明,裴顺祥,王祥福,聂必红,杨永明,梁洪海.香根草形态性状和光合特性对三峡库区消落带水陆生境变化的响应.西北植物学报,2012,32(11):2328-2335.
- [25] 国家林业局.森林土壤分析方法.北京:中国标准出版社,1999.
- [26] 李强,丁武泉,朱启红,宋力,曹优明,蒋山泉.水位变化对三峡库区低位狗牙根种群的影响.生态环境学报,2010,19(3):652-656.
- [27] 李兆佳,熊高明,邓龙强,谢宗强,樊大勇.狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力.生态学报,2013,33(11):3362-3369.
- [28] 裴顺祥,洪明,郭泉水,秦爱丽,朱莉,朱妮妮.三峡库区消落带水淹结束后狗牙根的光合生理生态特性.生态学杂志,2014,33(12):3222-3229.
- [29] 李彦杰,刘仁华,杨俊年,周大祥,秦洪文.水淹胁迫下三峡库区野生狗牙根根系酶活性变化.水土保持研究,2014,21(3):288-292.
- [30] Peng C R, Zhang L, Qin H J, Li D H. Revegetation in the water level fluctuation zone of a reservoir: an ideal measure to reduce the input of nutrients and sediment. Ecological Engineering, 2014, 71: 574-577.
- [31] 李强,丁武泉,王书敏,朱启红,杨俊,柯胜钱,秦露,杨林静,郑捷月,孟蕊雯.三峡库区多年高水位运行对消落带狗牙根生长恢复的影响.生态学报,2020,40(3):985-992.
- [32] 李强,丁武泉,朱启红,宋力.模拟沙埋对三峡库区低位消落带狗牙根恢复生长的影响.生态学杂志,2015,34(4):919-924.
- [33] 李强.泥沙掩埋和干旱对三峡库区消落带狗牙根生长恢复的影响.生态学报,2016,36(1):200-208.
- [34] 郑轶琦,郭琰,刘晶,冯灵辉,刘有战,张磊.狗牙根种质资源的根系分布特征及抗拉强度研究.广东农业科学,2014,41(21):45-48.
- [35] 钟荣华,鲍玉海,贺秀斌,高进长,阎丹丹,李峪,王铭锋.三峡水库消落带4种草本根系抗拉特性及根系粘聚力.水土保持学报,2015,29(4):188-194.
- [36] 徐文秀,鲍玉海,韦杰,杨玲,贺秀斌,李进林.水库消落带典型草本植物根系对土壤抗冲性能的影响.水土保持学报,2019,33(4):65-71,109-109.
- [37] Cohn E J, van Auken O W, Bush J K. Competitive interactions between *Cynodon dactylon* and *Acacia smallii* seedlings at different nutrient levels. The American Midland Naturalist, 1989, 121(2): 265-272.