

洪泽湖大堤不同植物群落的护堤防蚀效应

施 钦¹, 芦治国¹, 徐 铭², 张 锐¹, 华建峰¹, 陈昌仁²

(1.江苏省中国科学院植物研究所, 江苏 南京 210014; 2.江苏省洪泽湖水利工程管理处, 江苏 淮安 223100)

摘 要: [目的] 研究洪泽湖大堤不同植物群落土壤稳定性、水土保持功能及抗冲能力, 为洪泽湖大堤植物的选择及功能的提升提供科学依据。[方法] 通过称重法、重铬酸钾外加热氧化法、环刀法、湿筛法、索波列夫抗冲仪和静水崩解法测定洪泽湖大堤杨树、杨树与水杉混交林、水杉、朴树和狗牙根等不同植物群落的根系生物量、土壤有机质、容重、水稳定性团聚体、抗冲性和水稳性指数。[结果] 在所有的植物群落中, 杨树的平均胸径、树高、冠幅和郁闭度均最高。随着土层深度(0—45 cm)的增加, 5 种植物群落的根系生物量逐渐降低, 而且朴树根系生物量在各土层中均高于其他植物群落, 其次为杨树和狗牙根(除第 3 土层外)。大多数情况下, 杨树和朴树群落可以有效提高大堤 3 个土层的土壤容重、总孔隙度、有机质含量。此外, 0—15 cm 和 15—30 cm 土层中, 杨树群落的 <0.25 mm 团聚体含量, 以及朴树群落的 >0.25 mm 团聚体含量高于其他植物群落。不同植物群落对地表土壤的护堤防蚀效应明显不同。狗牙根和杨树群落的土壤抗冲性和水稳性指数最高, 其次为杨树×水杉和朴树群落, 水杉群落显著低于其他群落。相关性分析表明, 植物群落的护堤防蚀效应(土壤抗冲与水稳性指数)与根系生物量、土壤有机质含量、容重、总孔隙度显著正相关。[结论] 杨树、朴树和狗牙根群落土壤稳定性较高, 护堤防蚀能力突出, 针对目前以杨树为主的防护林, 可进行合理的林相改造、加强群落配置, 从而提升洪泽湖大堤防护林功能。

关键词: 洪泽湖大堤; 植被; 护堤防蚀; 土壤; 抗冲指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0042-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 施钦, 芦治国, 徐铭, 等. 洪泽湖大堤不同植物群落的护堤防蚀效应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 42-48. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20211126.002; Shi Qin, Lu Zhiguo, Xu Ming, et al. Soil anti-erosion effects under different vegetation types for Hongze Lake embankment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 42-48.

Soil Anti-erosion Effects Under Different Vegetation Types for Hongze Lake Embankment

Shi Qin¹, Lu Zhiguo¹, Xu Ming², Zhang Rui¹, Hua Jianfeng¹, Chen Changren²

(1. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014, China;

2. Jiangsu Provincial Hongze Lake Hydraulic Engineering Management Division, Huai'an, Jiangsu 223100, China)

Abstract: [Objective] The soil stability, soil and water conservation functions, and anti-scourability of different vegetation types were assessed in order to provide a scientific basis for species selection and function improvement of the Hongze Lake embankment shelterbelt. [Methods] Root biomass, soil organic matter, soil bulk density, porosity, water-stable aggregates, anti-scourability, and soil erosion resistance of *Populus simonii* var. *przewalskii*, *Celtis sinensis*, *P. simonii* var. *przewalskii* × *Metasequoia glyptostroboides*, *Cynodon dactylon*, and *M. glyptostroboides* were analyzed using the weight method, the potassium dichromate heating oxidation method, the ring-knife method, the wet sieving method, the Sobolev anti-rush experiment, and the hydrostatic disintegrating method, respectively. [Results] Among all of the vegetation types, *P. simonii* var. *przewalskii* was greatest in diameter at breast height, height, crown width, and canopy density. Root biomass of the five vegetation types decreased with the increasing soil depth from 0 to 45 cm, and *C. sinensis* had the highest values in each soil layer among the tested plants, followed by *P. simonii* var. *przewalskii* and *C. dactylon* (except for the third soil layer). In most cases, *Populus simonii* var. *przewalskii* and *C. sinensis* significantly increased soil organic matter, soil bulk density, and total porosity. Additionally,

收稿日期: 2021-05-10

修回日期: 2021-09-27

资助项目: 江苏省水利科技项目“洪泽湖大堤生态防护林功能提升关键技术与应用”(2019030)

第一作者: 施钦(1991—), 男(汉族), 江苏省无锡市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物资源与环境研究。Email: shiqin@cnbg.net。

通信作者: 陈昌仁(1976—), 男(汉族), 江苏省南京市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持等方面的研究。Email: jfhua@cnbg.net。

the amounts of microaggregates (< 0.25 mm) under *P. simonii* var. *przewalskii* and the amounts of macroaggregates (> 0.25 mm) under *C. sinensis* were much greater than those under other vegetation types in the 0—15 and 15—30 cm layers. The protecting effects on the embankment varied with the vegetation type. The soil under *P. simonii* var. *przewalskii* and *C. dactylon* was highest in soil anti-scourability and erosion resistance, followed by those under *Populus* spp. and *P. simonii* var. *przewalskii* \times *M. glyptostroboides*. The protecting effects under *M. glyptostroboides* were the lowest. Significantly positive relationships were observed for the effects on protecting the embankment from erosion indicated by soil anti-scourability and erosion resistance with root biomass, soil organic matter, soil bulk density, and total porosity. [Conclusion] Therefore, soils under *P. simonii* var. *przewalskii*, *C. sinensis*, and *C. dactylon* had high stability, and thus, these vegetation types have great potential for protecting embankments from erosion. For the present shelterbelt mainly planted to *P. simonii* var. *przewalskii*, reasonable forest improvement and plant community configuration could be used as effective measures to improve the function of the Hongze Lake embankment shelterbelt.

Keywords: Hongze Lake embankment; vegetation; shelterbelt; soil properties; anti-scourability index

防护林体系作为林业生态工程的主体在维护基础设施、抵御自然灾害和维持生态平衡等方面发挥着巨大作用^[1]。水利防护林在水域行洪区和堤防等范围内提供了生态防护功能,是生态环境建设和经济可持续发展的重要战略部署^[2]。江苏省河湖众多,水网密布,有丰富的河流、湖泊滩地、河堤以及水库坡地,为水利防护林营造提供了充分的空间。积极的水利绿化应用不仅可以产生令人瞩目的社会效益,更有助于生态文明建设取得积极成效。当前中国人工林建设蓬勃发展,在林分管理、分类经营、体系建设等方面研究较多^[3-5],但对于水利防护林的水土保持功能以及护堤防蚀效益研究较少。

土壤抗蚀性表现为土壤对侵蚀营力分力和搬运作用的抵抗能力,是控制土壤承受降雨和径流分离及输移等过程的综合效应。典型喀斯特森林土壤研究显示有机质含量、水稳性团聚体、团聚度能较好地表征喀斯特林地土壤抗蚀性^[6]。黄进等^[7]针对桐庐山生态林选取土壤水稳性指数、团聚度、分散率、水稳性团聚体含量、有机质含量为评价指标,构建了土壤抗蚀性等级评价体系。防护林因其林龄、林分树种组成以及林下结构配置不同,土壤抗蚀性能也有所差异。洪泽湖大堤防护林主要由杨树(*Populus simonii* var. *przewalskii*)、垂柳(*Salix babylonica*)和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)组成,其间次生刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和朴树(*Celtis sinensis*)等,是防止风浪侵蚀湖堤的重要防护工程。目前关于洪泽湖大堤的防护林研究均集中于树种种植与生长表现^[8-9],或者仅仅是测定林下理化性质差异^[10],并未针对不同植物群落护堤防蚀效应开展进一步探讨。因此,本文拟通过对洪泽湖大堤防护林群落开展定量测定,深入研究大堤植物根系和土壤抗冲抗蚀性能及

其稳定性的关系,分析不同树种林分群落结构水土保持功能及护堤防蚀效应的差异,以期为洪泽湖大堤生物防护工程提供数据支持,同时为水利防护林的建设设计与科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于江苏省淮安市洪泽区($32^{\circ}13' N$, $118^{\circ}49' E$),属北亚热带季风气候,年均气温 $16.3^{\circ}C$,四季分明,无霜期 240 d,年平均降水量 940 mm。洪泽湖大堤全长 67.25 km,其中省管段 25.1 km,防护林台面高程为 14.5 m,宽度为 50 m,迎湖面堤防面积约 106 hm^2 ,目前利用方式为全部种植植物。

1.2 样地设置

采取典型样地取样法,于 2020 年 7 月在洪泽湖大堤迎水面,依据防护林植物组成及群落特征选取经营一致(常规管护)、长势良好的 5 种群落作为测定样地,包括杨树群落(*Populus simonii* var. *przewalskii*)、水杉群落(*Metasequoia glyptostroboides*)、杨树与水杉混交林群落(*Populus simonii* var. *przewalskii* \times *Metasequoia glyptostroboides*)、朴树群落(*Celtis sinensis*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)群落,各群落的坡向和坡位基本相同。每个植物群落内分别选取代表性样地($25\text{ m} \times 25\text{ m}$),调查林分树种组成及生长状况,主要调查指标为树高、胸径、冠幅和郁闭度。随后,以 S 型随机选取 4 个典型土样采集点挖取土壤剖面,用 50 cm^3 环刀沿剖面按 0—15, 15—30, 30—45 cm 将土壤分为 3 层取原状土。因此,每种植物群落每土层取样 4 个,即 4 次重复;本试验共有土样 60 个。将所取样品标记并装入自封袋后带回实验室进行相关指标测定。

1.3 指标测定

用钢围尺在树干距地面 1.3 m 处测得的直径即为树木胸径;使用布鲁莱斯测高器测量树高;冠幅为树冠东西和南北两方向的投影直径。郁闭度测量采用系统样点抬头观测法,沿样方对角线进行一米一抬头观测,用树冠遮挡点除以总样点数即为郁闭度。用环刀在每层土壤剖面取样后,去除土壤中的昆虫和石块等异物,分拣根系,依次用 1.0 mm 和 0.5 mm 孔径的不锈钢网筛冲洗。反复过筛冲洗 3~5 次后,用镊子将细根从筛子中挑出,用滤纸将水吸干,计数,然后将其置于烘箱中 80 °C 恒温下烘干 48 h 后称重,计算根系生物量。

土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度测定采用环刀法,土壤有机质含量测定采用重铬酸钾外加热氧化法^[11],土壤水稳性团聚体含量采用湿筛法测定^[12]。土壤侵蚀往往最先作用于表层土壤,因此本试验仅针对 0—15 cm 的表层土壤进行了抗冲行和抗蚀性测定。土壤抗冲性测定应用 C.C.索波列夫抗冲仪,以表层 0—15 cm 土壤的抗冲指数表示。在 1 个大气压力下,用 10 个直径 0.7 mm 的水柱对表层土壤持续冲击 1 min,使其产生水蚀穴,以 10 个水蚀穴的平均直径和平均深度乘积的倒数作为该土层的抗冲指数^[13]。

$$A = \frac{100}{\sum_{i=1}^{10} d_i \times \sum_{i=1}^{10} l_i} \quad (1)$$

式中:A 为抗冲指数; d_i 为第 i 个水蚀穴的直径(cm); l_i 为第 i 个水蚀穴的深度(cm)。

土壤崩解率和水稳性指数采用静水崩解法测定,将干筛后留在 3 mm 筛上的 3~6 mm 的土壤粒体数出 100 粒,放入 1 mm 孔径不锈钢网筛上进行浸水试

验,使蒸馏水刚好覆盖土粒表面。每隔 1 min 记录崩解的土粒数目,连续记录 10 min,然后计算土壤水稳性指数^[12]。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{10} P_i K_i + P}{S} \quad (2)$$

式中: K 为土壤水稳性指数; P_i 为第 i min 分散的土粒数量; P 为 10 min 内未分散的土粒数量; K_i 为第 i min 的校正系数; S 为供试土粒总数,即 100。

1.4 数据处理

试验数据的统计处理及相关性分析利用 Microsoft Excel 2007(Microsoft Inc, USA)、SPSS 19.0 (IBM Software, USA) 进行,采用 Duncan 检验进行显著性分析,作图软件采用 Origin Pro 9.1 (Origin Lab, USA)。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落的生长情况

在所有植物群落中,杨树的平均胸径、树高、冠幅和郁闭度均高于其他植物,而朴树的平均胸径、树高和冠幅最低,水杉的郁闭度最低(表 1)。在 0—45 cm 土层深度内,随着土层深度的增加,5 种植物群落的根系生物量逐渐降低。0—15 cm 土层根系生物量占总根系生物量的比例,最高的为朴树群落,达到 65.2%,而杨树×水杉占比最低,仅为 47.7%。0—15 cm 土层,朴树根系生物量最高($p < 0.05$),其余依次为狗牙根、杨树、杨树×水杉、水杉;15—30 cm 土层,杨树和朴树的根系生物量显著高于($p < 0.05$)其他植物群落;30—45 cm 土层,朴树根系生物量最高($p < 0.05$),狗牙根根系生物量仅为 0.22 kg/m³,显著低于($p < 0.05$)木本群落(表 1)。

表 1 不同植物群落的生长情况

植物群落 类型	平均 胸径/cm	平均 树高/m	平均冠幅/ m×m	郁闭度	不同土层根系生物量/(kg·m ⁻³)		
					0—15 cm	15—30 cm	30—45 cm
狗牙根	—	—	—	—	2.12 ^{ab}	0.96 ^{bb}	0.22 ^{cd}
杨树	48.7	40.6	4.8×5.2	0.87	1.76 ^{ab}	1.42 ^{ba}	0.37 ^{cd}
水杉	23.6	27.3	2.2×2.4	0.73	1.27 ^{ac}	0.94 ^{bb}	0.45 ^{cd}
杨树×水杉	29.6	31.2	3.4×4.5	0.76	1.38 ^{ac}	0.88 ^{bb}	0.61 ^{cd}
朴树	15.3	4.7	1.8×1.9	0.79	4.11 ^{aA}	1.25 ^{ba}	0.94 ^{aA}

注:不同小写字母表示同一植物群落不同土层之间差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示同一土层表示不同植物群落之间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同植物群落土壤容重和孔隙度

洪泽湖大堤不同植物群落的土壤容重在 1.19~1.46 g/cm³ 之间变化,且 0—15 cm 和 15—30 cm 的土壤容重显著低于($p < 0.05$)底层(30—45 cm),表明底层土壤更为紧实(表 2)。在所有植物群落中,狗牙根、杨树和朴树群落各土层的土壤容重较大,而水杉

(1.19~1.35 g/cm³)和杨树×水杉混交林群落(1.27~1.39 g/cm³)的土壤容重较低,说明相对其他植物群落,水杉和杨树×水杉混交林群落的土壤较为松散(表 2)。

杨树群落和杨树×水杉混交林群落各层土壤总孔隙度和非毛管孔隙度的变化趋势相同,表现为

0—15 cm 和 15—30 cm 土层显著高于($p < 0.05$)30—45 cm 土层。大多数情况下,杨树和朴树群落 3 个土层的总孔隙度高于其他群落,说明种植杨树和朴树防护林可以明显增强土壤的通透性。此外,水杉群落的土壤毛管孔隙度在所有群落中最低,平均为 17.7%,而狗牙根群落的非毛管孔隙度最低,平均为 11.1%(表 2)。

表 2 洪泽湖大堤不同植物群落土壤容重及孔隙度

群落类型	土层深度/cm	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
狗牙根	0—15	1.32 ^{bAB}	38.7 ^{aB}	27.2 ^{aA}	11.5 ^{aC}
	15—30	1.36 ^{bA}	37.2 ^{aB}	26.7 ^{aA}	10.5 ^{aC}
	30—45	1.42 ^{aA}	36.8 ^{aB}	25.4 ^{aAB}	11.4 ^{aC}
杨树	0—15	1.35 ^{bA}	45.2 ^{aA}	27.3 ^{aA}	17.9 ^{aB}
	15—30	1.39 ^{bA}	44.6 ^{aA}	27.1 ^{aA}	17.5 ^{aB}
	30—45	1.46 ^{aA}	39.8 ^{bAB}	26.4 ^{aA}	13.4 ^{bC}
水杉	0—15	1.19 ^{bb}	39.7 ^{aB}	17.9 ^{aC}	21.8 ^{aA}
	15—30	1.32 ^{bAB}	38.6 ^{aB}	18.3 ^{aC}	20.3 ^{aA}
	30—45	1.35 ^{bB}	36.2 ^{aB}	17.1 ^{aC}	19.1 ^{aB}
杨树×水杉	0—15	1.27 ^{bB}	40.3 ^{aB}	22.6 ^{aB}	17.7 ^{aB}
	15—30	1.28 ^{bB}	39.8 ^{aB}	24.7 ^{aAB}	15.1 ^{bb}
	30—45	1.39 ^{aAB}	34.7 ^{bB}	23.5 ^{aB}	11.2 ^{cC}
朴树	0—15	1.31 ^{bAB}	44.3 ^{aA}	24.9 ^{aB}	19.4 ^{aAB}
	15—30	1.38 ^{bA}	42.1 ^{aB}	22.1 ^{aB}	20.0 ^{aA}
	30—45	1.42 ^{aA}	41.1 ^{aA}	19.3 ^{bC}	22.2 ^{bA}

2.3 不同植物群落的土壤有机质和水稳定性团聚体含量

依据全国土壤养分含量分级标准表,洪泽湖大堤 5 种植物群落的土壤有机质含量平均值在 4 级及以上,土壤较为肥沃。在 0—45 cm 土层范围内,5 种植物群落土壤有机质含量随土层深度增加都呈递减趋势。0—15 cm 和 15—30 cm 土层,杨树和朴树群落的土壤有机质含量在所有植物群落中最高($p < 0.05$),而水杉群落最低($p < 0.05$),分别为 22.2, 18.3 g/kg。

水稳性团聚体是由有机质胶结而成的团粒结构,被水浸湿后不易解体,具有较高的稳定性。从表 3 可以看出,各粒径团聚体含量从大到小依次为 < 0.25 mm 团聚体, > 2 mm 团聚体, 0.05~0.25 mm 团聚体以及 0.25~2 mm 团聚体。5 种群落各土层团聚体含量差异变化较大,各团聚体含量随着土层没有一致性变化。0—15 cm 和 15—30 cm 土层中,杨树群落 < 0.25 mm 团聚体含量高于其他植物群落。除朴树群落外,其余 4 种群落以 < 0.25 mm 团聚体为主,占比均超过 50%。朴树群落 > 0.25 mm 团聚体含量最高(592 g/kg),依次是杨树×水杉(499 g/kg)、狗牙根(439 g/kg)、水杉(439 g/kg),最低是杨树(421 g/kg)。 > 0.25 mm 的团聚体是团粒结构体,其数量大小与土壤的稳定性状况呈正相关关系。可见,5 种植物群落中,朴树可以更好地维持洪泽湖大堤土壤稳定性。

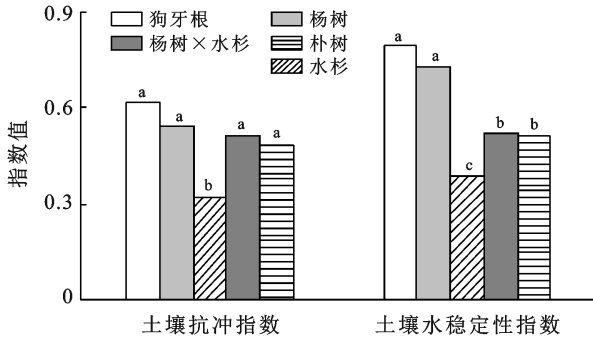
表 3 不同群落水稳性团聚体及有机质的分布特征

群落类型	土层深度/ cm	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	水稳性团聚体/($g \cdot kg^{-1}$)			
			> 2 mm	0.25~2 mm	0.05~0.25 mm	< 0.25 mm
狗牙根	0—15	32.3 ^{aB}	228 ^{aA}	102 ^{aC}	118 ^{bb}	552 ^{bAB}
	15—30	22.4 ^{bb}	234 ^{aA}	96 ^{aC}	173 ^{aA}	497 ^{cC}
	30—45	20.2 ^{bb}	208 ^{bAB}	112 ^{aC}	45 ^{cC}	635 ^{aA}
杨树	0—15	48.2 ^{aA}	226 ^{aA}	106 ^{bC}	71 ^{bC}	597 ^{bA}
	15—30	35.1 ^{bA}	201 ^{aB}	132 ^{aB}	46 ^{bC}	621 ^{aA}
	30—45	28.7 ^{aA}	187 ^{bBC}	129 ^{aBC}	164 ^{aB}	520 ^{aB}
水杉	0—15	22.2 ^{aC}	223 ^{aA}	137 ^{bB}	51 ^{cC}	589 ^{aA}
	15—30	18.3 ^{bcC}	157 ^{bC}	155 ^{aB}	126 ^{bb}	562 ^{aB}
	30—45	13.1 ^{bC}	169 ^{bC}	141 ^{abB}	169 ^{aB}	521 ^{bb}
杨树×水杉	0—15	32.8 ^{aB}	177 ^{aB}	126 ^{aBC}	174 ^{bA}	523 ^{bb}
	15—30	23.2 ^{bC}	183 ^{aBC}	138 ^{aB}	118 ^{cB}	561 ^{aB}
	30—45	17.4 ^{cBC}	165 ^{aC}	134 ^{aB}	282 ^{aA}	419 ^{cC}
朴树	0—15	48.9 ^{aA}	174 ^{bB}	234 ^{aA}	197 ^{aA}	395 ^{aC}
	15—30	36.3 ^{bA}	209 ^{bB}	223 ^{abA}	163 ^{bA}	405 ^{aD}
	30—45	20.7 ^{cB}	228 ^{aA}	201 ^{bA}	148 ^{cB}	423 ^{cC}

2.4 不同植物群落的土壤抗冲指数和水稳性指数

如图 1 所示,0—15 cm 表层土壤抗冲指数在狗牙根、杨树、杨树×水杉和朴树群落之间没有显著差异,但是均显著高于($p < 0.05$)水杉群落。狗牙根和

杨树群落 0—15 cm 表层土壤的水稳性指数显著高于($p < 0.05$)朴树和杨树×水杉群落,而水杉群落则显著低于($p < 0.05$)其他植物群落。这表明水杉群落表层土壤的抗侵蚀能力最弱,林下土壤遇水更容易崩蚀。



注:不同小写字母表示不同植物群落之间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 洪泽湖大堤不同植物群落表层土壤抗冲指数和水稳性指数

2.5 植物群落根系生物量与土壤理化性质的相关性分析

如表 4 所示,植物根系生物量与土壤有机质含量、总孔隙度、0.25~2 mm 团聚体含量、抗冲指数和水稳性指数呈极显著正相关($p < 0.01$),同样,其与土壤容重和 >2 mm 团聚体达到显著正相关($p < 0.05$)。然而,植物根系生物量与 <0.25 mm 团聚体极显著负相关($p < 0.01$)。此外,土壤有机质含量与土壤容重、总孔隙度、毛细管孔隙度、>2 mm 团聚体、抗冲指数和水稳性指数呈极显著正相关($p < 0.01$)。此外,植物群落土壤的抗冲指数和水稳性指数还与土壤容重($p < 0.01$)、总孔隙度($p < 0.05$)显著正相关。

表 4 植物根系生物量与土壤理化性质的相关性分析

项目	根系生物量	有机质	土壤容重	总孔隙度	毛细管孔隙度	非毛细管孔隙度	>2 mm 团聚体	0.25~2 mm 团聚体	0.05~0.25 mm 团聚体	<0.25 mm 团聚体	抗冲指数	水稳性指数
根系生物量	1	0.672**	0.495*	0.654**	0.026	0.430	0.548*	0.854**	0.317	-0.825**	0.917**	0.677**
有机质		1	0.889**	0.919**	0.585**	0.081	0.681**	0.351	-0.048	-0.309	0.693**	0.761**
土壤容重			1	0.705**	0.804**	-0.270	0.338	0.018	-0.333	-0.019	0.631**	0.900**
总孔隙度				1	0.267	0.431	0.905**	0.497*	-0.115	-0.302	0.517*	0.516*
毛细管孔隙度					1	-0.754**	-0.126	-0.457*	-0.223	0.257	0.344	0.693**
非毛细管孔隙度						1	0.734**	0.773**	0.137	-0.456*	0.040	-0.290
>2 mm 团聚体							1	0.624**	0.007	-0.352	0.280	0.135
0.25~2 mm 团聚体								1	0.507*	-0.899**	0.624**	0.196
0.05~0.25 mm 团聚体									1	-0.777**	0.359	-0.109
<0.25 mm 团聚体										1	-0.751**	-0.291
抗冲指数											1	0.850**
水稳性指数												1

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

防护林是洪泽湖大堤防洪工程的重要组成部分,植物尤其是乔木为主体的防护林群落通过地上部分,包括冠层、地表枯落物以及茎干等有效地减弱侵蚀动力对地表的冲刷作用,不仅可以增加入渗、减缓流速以及分散大堤股流,同时能改善土壤结构,较大提升土壤抗侵蚀能力^[14-16]。本研究对洪泽湖 5 种植物防护林群落的调查表明,杨树的平均树高胸径和郁闭度等均远高于其他几种木本植物防护林群落,而这几个指标是森林稳定性及森林生态影响的决定因素。杨树和朴树防护林有机质含量在所有防护林群落中较高,土壤的通透性强,水杉群落表层土根系生物量最低,且抗侵蚀能力最弱。

朴树群落土壤团粒结构体含量最高,水稳性最优,不易受到外界环境的扰动。团聚体形成与土壤有机质含量存在密切关系,因为土壤有机质是土壤水稳

性团聚体的有机胶结剂^[17-18]。四川省内江市沱江护岸植被研究显示,土壤水稳性指数与 >0.25 mm 团聚体、有机质的关联系数达到 0.815, 0.829^[19]。根系与土壤有机质的关系研究发现,根系输入有机质的贡献率高于地上部分的枯落物,仅仅是细根(<2 mm)的分解,就可将超过 50% 的养分归还到森林生态系统中^[20]。在洪泽湖大堤防护林中,朴树和杨树群落根系生物量显著高于其他几种植物群落,其根系分解帮助有机质从防护林生物库转移到大堤林下土壤库,因而其林下土壤在水稳性方面较有优势。不仅如此,朴树群落相比于水杉和杨树有更多的林间灌木,林下植被多样性与覆盖度较高,凋落物分解代谢较快,相比于其他植物群落能有效促进土壤有机碳的增加,是其土壤水稳性高的物质基础。

杨树 × 水杉群落土壤稳定性大于杨树和水杉群落,主要是因为针叶与阔叶的混交林树冠层厚间隔,林内光照利用率较高,林下物种丰富度大于纯杨树和

水杉群落。杨树作为洪泽湖防护林的主要树种,虽然其有机质含量和土壤通气蓄水效应较高,但是趋于老化且病虫害严重,林相杂乱,导致土壤稳定性效益减退^[21]。康希睿等^[22]研究表明中度混交林地不仅群落稳定性要高于纯林,其林下物种丰富度和林下更新能力也有较明显优势。苏北海堤杉木×杨树混交林林木生长研究结果显示,混交林林木生长、林地土壤结构状况和养分含量均好于纯林^[23]。作为针叶树种的水杉群落,其土壤稳定性及抗侵蚀效益均不理想,这与其他学者研究结论基本一致^[24-26],针叶林的水土保持效益显著低于阔叶林。针对洪泽湖大堤存在的杨树林效益低下问题,可以通过与水杉等其他树种合理混交,后期通过调节杨树和其他树种的种间关系,以达到充分利用地力提高大堤林分稳定性的目的。

本试验相关性分析证实防护林群落土壤的抗蚀性与表层土壤中植物根系生物量密切相关。原因在于根系能通过提高土壤的抗冲性、抗蚀性能有效地减少土壤流失量,使植被覆盖条件下的地表侵蚀作用大大降低,因而植物根系发达、分布广泛的土壤往往也具有较强的抗蚀性^[27-28]。从表层土抗冲指数与水稳性指数来看,狗牙根群落的防蚀效应明显优于其他木本植物群落,这主要是因为草本植物根系主要集中在地表,相对于木本植物,狗牙根根系蔓延力强,易形成交错的密集网状根系,对表层土壤的抗蚀作用也显得突出^[29]。李东林等^[30]在对京杭运河淮安段水利防护林群落护堤防蚀效应中也得出早熟禾(*Poa annua*)群落土壤抗蚀性最强的结论。嫩江大堤护坡植物根系及土壤抗冲、抗蚀及抗剪强度的测定分析,草本植物根系有较强的固持土壤功能,抗冲指数与根长、根量间有明显的相关性^[31]。但是狗牙根群落在30—45 cm 土层根系生物量含量显著低于木本群落,从对深层次土壤的影响来看,木本植物护堤效益将远远超过狗牙根群落。

4 结论

不同防护林群落在洪泽湖护堤抗蚀效益方面有所差异,杨树、朴树和狗牙根群落土壤稳定性较高,护堤防蚀能力突出。植物群落的护堤防蚀效应与根系生物量、土壤有机质含量、容重、总孔隙度显著正相关。防护林群落能通过地表凋落物及根系的综合影响明显改善林下土壤的物理性质。虽然杨树群落防护能力突出,但是老化严重,遇台风易折,虫害和杨絮问题日益暴露,针对目前以杨树为主的防护林,可进行合理的林相改造、加强群落配置等提高群落整体生态效应。与此同时,构建密度适宜的针阔叶混交林可

以更高效地提升洪泽湖大堤水杉防护林的防浪护堤效益。

[参 考 文 献]

- [1] Zhao Wenzhi, Hu Guanglu, Zhang Zhihui, et al. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: A case study in the Hexi Corridor, Northwest China [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33(2): 119-125.
- [2] Dai Limin, Li Shanlin, Zhou Wangming, et al. Opportunities and challenges for the protection and ecological functions promotion of natural forests in China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 410: 187-192.
- [3] 陈幸良, 巨茜, 林昆仑. 中国人工林发展现状、问题与对策 [J]. *世界林业研究*, 2014, 27(6): 54-59.
- [4] 梅梦媛, 雷一东. 我国人工林新时代发展形势分析 [J]. *世界林业研究*, 2019, 32(3): 73-77.
- [5] Li Chunyang, Zhou Xiaofeng. Status and future trends in plantation silviculture in China [J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2000, 29(6): 354-355.
- [6] 肖盛杨, 舒英格, 陈梦军. 喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性 [J]. *水土保持通报* [J], 2019, 39(4): 30-35, 81.
- [7] 黄进, 杨会, 张金池. 桐庐生态公益林主要林分类型土壤抗蚀性研究 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 49-52, 64.
- [8] 徐铭, 刘洪林, 陈凯. 堤防工程精细化管理浅析 [J]. *江苏水利*, 2018(8): 38-41.
- [9] 吴明祥. 洪泽湖大堤防浪林防护林种植与研究 [J]. *科学技术创新*, 2018(29): 132-133.
- [10] 宋卫婷, 张焕朝. 洪泽湖古堰森林公园土壤理化性质分析 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(9): 161-163.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 王灿, 胡海波, 范真, 等. 麻栎林龄对土壤水稳性团聚体及其有机碳含量的影响 [J]. *土壤*, 2019, 51(5): 979-985.
- [13] 任改, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种人工林地土壤抗蚀性分析 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 20-24.
- [14] 郭京衡, 曾凡江, 李尝君, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘 3 种防护林植物根系构型及其生态适应策略 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(1): 36-44.
- [15] 毛娜, 黄来明, 邵明安. 黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素 [J]. *土壤*, 2019, 51(2): 381-389.
- [16] Dunkerley D. A review of the effects of throughfall and stemflow on soil properties and soil erosion [J]. *Precipitation Partitioning by Vegetation*, 2020: 183-214.
- [17] Tong Lihong, Zhu Ling, Lv Y, et al. Response of organic carbon fractions and microbial community composition of soil aggregates to long-term fertilizations in an

- intensive greenhouse system [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2): 641-652.
- [18] Chen Yanjie, Ren Ke, Su Jiaen, et al. Rotation and organic fertilizers stabilize soil water-stable aggregates and their associated carbon and nitrogen in flue-cured tobacco production [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(1): 192-205.
- [19] 谢贤健, 张彬. 基于耦合关联分析的护岸植被恢复土壤抗蚀性综合评价[J]. *土壤*, 2019, 51(3): 609-616.
- [20] Li Fanglan, Hu Hui, McCormack M L, et al. Community-level economics spectrum of fine-roots driven by nutrient limitations in subalpine forests [J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(3): 1238-1249.
- [21] 刘红升, 许倩, 张学昌, 等. 洪泽湖大堤省管段水土资源开发利用的实践与建议[J]. *经营与管理*, 2018(12): 147-150.
- [22] 康希睿, 李晓刚, 张涵丹, 等. 不同混交措施下杉木人工林群落稳定性特征[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(9): 2912-2920.
- [23] 万福绪, 杨东. 苏北海堤杉木杨树混交林林木生长及土壤肥力研究[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(2): 43-46.
- [24] 梁向锋, 赵世伟, 华娟, 等. 子午岭林区典型植被下土壤结构及稳定性指标分析[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 12-16.
- [25] 胡建朋, 杨吉华, 罗明达, 等. 山东砂石山区不同林分类型土壤的蓄水效益[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5): 67-72.
- [26] Qin Juan, Shangguan Zhouping. Effects of forest types on leaf functional traits and their interrelationships of *Pinus massoniana* coniferous and broad-leaved mixed forests in the subtropical mountain, Southeastern China [J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(12): 6922-6932.
- [27] 宋坤, 陈玉霞, 潘晓星, 等. 5 种护坡植物根系土壤抗侵蚀性比较[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(9): 63-67.
- [28] Wu Gaolin, Liu Yifan, Cui Zeng, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A Meta-analysis [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5): 875-885.
- [29] Pair J C, Keen R A, Taliaferro C M, et al. Registration of 'midlawn' turf bermudagrass [J]. *Crop Science*, 1994, 34(1): 306-307.
- [30] 李冬林, 季永华, 戴小琳, 等. 京杭运河淮安段水利防护林群落护堤防蚀效应[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(6): 705-710.
- [31] 代全厚, 张力, 刘艳军, 等. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. *水土保持通报*, 1998, 18(6): 8-11.

(上接第 41 页)

- [24] 徐崑尧, 孙虎, 崔徐甲, 等. 陕西大柳塔煤矿复垦地植被群落与土壤因子的关系[J]. *地球与环境*, 2018, 46(1): 82-88.
- [25] 徐友宁, 李智佩, 陈社斌, 等. 大柳塔煤矿采煤塌陷对土地沙漠化进程的影响[J]. *中国地质*, 2008, 35(1): 157-162.
- [26] 刘哲荣, 燕玲, 贺晓, 等. 采煤沉陷干扰下土壤理化性质的演变: 以大柳塔矿区为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(11): 133-138.
- [27] 宋亚新. 神府—东胜采煤塌陷区包气带水分运移及生态环境效应研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2007.
- [28] 刘辉, 何春桂, 邓喀中, 等. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(3): 380-384.
- [29] 康世勇, 郝峙. 神府东胜煤田自然环境特点与矿区生态环境保护[J]. *煤矿环境保护*, 1999, 13(4): 15-16.
- [30] 丁玉龙. 煤矿开采沉陷对四合木的影响与保护对策研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [31] 唐金生, 张如良. 林分根系分布及其对土壤抗冲性的影响[J]. *浙江林业科技*, 2005, 25(4): 29-31.
- [32] 李任敏, 常建国, 吕皎, 等. 太行山主要植被类型根系分布及对土壤结构的影响[J]. *山西林业科技*, 1998(1): 18-20.
- [33] 姚栋栋. 半干旱区 2 种灌木生理与生长特征对根系损伤的响应[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [34] 左志严. 5 种植物根系力学特性及其对土壤水分的响应[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [35] 王博, 刘静, 王晨嘉, 等. 半干旱矿区 3 种灌木侧根分支处折力损伤后的自修复特性[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3541-3549.
- [36] 王博. 半干旱区水土保持灌木根系拉拔损伤后的自修复机制[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [37] 岳辉. 采煤沉陷区受损根系菌根修复机理及其生态效应研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [38] 李少朋, 毕银丽, 余海洋, 等. 模拟矿区复垦接种丛枝菌根缓解伤根对玉米生长影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 211-216.