

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.005

嫩江干流防浪林消浪影响因素分析

王建婷,董增川,徐伟,任杰

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:为研究嫩江干流防浪林影响因素对消浪效果的影响,合理设计防浪林优化布局,以东阳堤防为例,利用消浪性能计算公式,选取防浪林排列方式、行株距、树干半径、树冠半径、宽度、刚度作为影响因素,研究其对消浪效果的影响,并进行定量计算和理论分析。结果表明:种植棵数相同时,等边三角形排列方式的消浪效果最好;在不影响泄洪的前提下,防浪林的树干半径、树冠半径、宽度越大或行株距越小时,消浪作用越强;相同宽度下,刚性植物的消浪效果比柔性植物好,且消浪时间更持久;东阳堤防适合营造以刚性植物为主的防浪林,行株距为 1.5~2 m,以宽度 30~50 m 为宜,刚柔混合,且当柔性植物高度大于刚性植物树冠最低处时,消浪效果更好。

关键词:防浪林;消浪影响因素;消浪公式;消浪效果;嫩江干流东阳堤防

中图分类号:TV871.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)01-0030-07

Influencing factors analysis of wave dissipation of the wavebreak forest in mainstream of Nenjiang River

WANG Jianting, DONG Zengchuan, XU Wei, REN Jie

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai university, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect of influencing factors on the wave dissipation and figure out the optimized layout of wavebreak forest in the Nenjiang River mainstream, influencing factors including the arrangement mode, row spacing, stem radius, crown radius, width and rigidity were identified in this study. Then, the quantitative calculation and theoretical analysis based on the calculation formulas of wave dissipation performance were conducted for the Dongyang dike. The results indicate that the equilateral triangle is the best for the wave dissipation under the same trees; in the premise of not affecting the flood discharge, the dissipation effect is better when the forest stem radius, crown radius, and width is larger or the row spacing is smaller; the effect and duration of rigid vegetation is better than the flexible vegetation under a same width; a forest mainly consisting of the rigid vegetation and mixing with the flexible vegetation should be the optimized plan for the Dongyang dike, while the proper row spacing and width are 1.5–2 m and 30–50 m, respectively. Besides, the flexible vegetation should be higher than the lowest top of rigid vegetation to achieve a better performance.

Key words: wavebreak forest; influence factors of wave dissipation; wave dissipation formulas; wave dissipation effect; Dongyang dike in the Nenjiang River mainstream

目前,防浪林在我国南海、东海、洞庭湖、洪泽湖、长江、黄河、淮河等江海河湖的堤岸都有大规模种植^[1-5]。营造防浪林是延长堤防寿命、增强抗洪能力、改善当地环境、维护生态平衡的一项生态、经济和社会效益显著的生物工程措施,具有投资少、作用大、性能强、易于普遍推广等优点^[6]。防浪林尤其对削减风浪爬高和防止堤防破坏有显著作用。因此,研究防浪林消浪影响因素的消浪效果,对科学提出防浪林优化布局

基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划(GZ16B031, GZ16B035)

作者简介: 王建婷(1993—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源、生态水利研究。E-mail: wjting@hhu.edu.cn

通信作者: 董增川,教授。E-mail: dongzengchuan@163.com

引用本文: 王建婷,董增川,徐伟,等. 嫩江干流防浪林消浪影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):30-36. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.005.

以及营造防浪林工程的关键技术等具有重要理论指导意义和实用价值,也是响应生态护坡建设、湿地治理等生态水利工程生产实际和自然环境和谐共处的重要举措。笔者以嫩江干流东阳堤防为例,运用消波性能计算公式和控制变量法,选取防浪林排列方式、行株距、树干半径、树冠半径及宽度、植物刚度作为影响因素,研究其对消浪效果的影响。

1 研究区概况

嫩江干流东阳堤防位于齐齐哈尔市甘南县境内,自东阳镇萨马街村北 3 km 处,向西南沿嫩江右岸经隆盛、沿江、东方、同盟、东阳村至金坑与巨宝堤防相连。砂基及双层地基堤占的比重较大,堤防迎水坡除少部分有工程护坡外,绝大部分是自然状态。该河段水面宽阔,宽约 4 ~ 8 km,加上水深和风速的影响,受风浪的威胁较大,极易造成堤防滑坡、塌岸、波浪淘刷等现象的发生^[7]。现状防洪标准为 10 年一遇,预计经嫩江干流工程治理后,2017 年防洪标准可达 50 年一遇。该段现有防浪林 23.99 km,宽度为 10 m,行株距为 2 m×2 m,成等边三角形或正方形排列,多为 5 ~ 8 年生刚性乔木,树种大部分为杨树,少量柳树,沿堤防迎水侧不连续分布,局部断带最长 2.60 km。东阳堤防如图 1 所示。

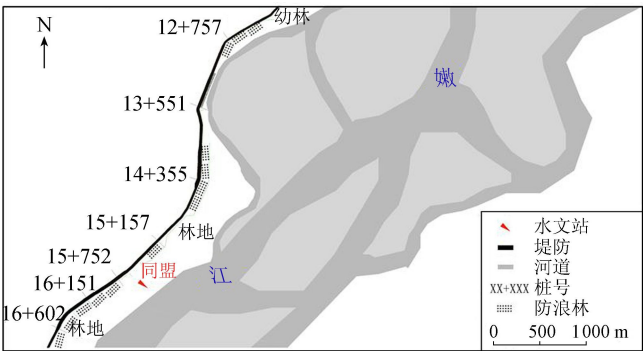


图 1 东阳堤防示意图

Fig. 1 Sketch of the Dongyang dike

2 防浪林消浪性能计算公式

鉴于防浪林对江海河湖堤岸重要的防护作用,防浪林的消浪机理研究、消浪效果等级评价得到了国内外学者的广泛关注^[8]。目前研究手段主要包括原型观测、物理模型和数学模型三大类。原型观测方面,颜学恭等^[4]对长江中下游刚性防浪林不同林带结构进行消浪效果原型观测,提出消浪效果与防浪林的排数成正比,消浪与林带纵剖面盖度紧密相关。李锡泉等^[3]通过对洞庭湖区防浪林在大洪水中防浪能力的调查,认为刚性林带的树冠比树干的防浪效果好。同时认为柔性植物虽有消浪效果,但高度达不到护堤的要求。Kassi 等^[9]通过对湿地观测数据的分析,发现柔性植物的消浪效果是刚性植物的 50%,且大约 65% 的波能是在距沼泽边缘 19 m 的范围内被消耗掉。物理模型方面,赵东梁等^[10]通过大量水槽试验,研究了浮式植物消浪装置消浪效率与植物密度、植物带相对宽度、入射波波高之间的关系,对其试验数据进行回归分析,得到了消浪效率公式。章家昌^[11]在实验室内模拟种植防浪林,考虑了防浪林主干半径、树冠半径、株距、宽度等参数,研究其消浪效果,计算波高衰减系数,提出了计算刚性林木的消波性能公式。傅宗甫^[12]根据某工程柔性植物消浪性能的实测结果,在实验室水槽中对柔性植物的消浪效果进行模拟,通过回归分析得出柔性植物消浪系数的计算公式。数值模型方面,目前主要集中在对海岸防浪林的消浪研究,广泛使用的有基于动谱平衡方程的 SWAN 模型、基于椭圆形缓坡方程的 CGWAVE 模型和基于 Boussinesq 方程的 MIKE21-BW 模型等^[13-17]。模型比较如表 1 所示。例如学者曹海锦等^[16]对未考虑植被晃动的 SWAN-VEG 模型进行了修改,用于模拟计算波浪在柔性植被场中的衰减,并采用人工柔性材料进行物理模型试验,对计算结果进行对比验证。虽然目前国内外对防浪林建设有了一定的研究,但是对于防浪林建设的全方位定量研究还很少见,且对河岸防浪林缺乏系统科学的种植与规划以及定量分析,所以研究防浪林排列方式、行株距、树木尺寸、宽度、刚度等因素的消浪效果影响是一项具有学术意义的工作,对合理设计防浪林种植方式,完善堤防防浪林工程有着重要的指导作用和实用价值。

表 1 常用数值模型比较

Table 1 Comparison of the commonly used numerical models

模型名称	开发者	原理	特点
SWAN	荷兰代尔夫特理工大学	动谱平衡方程	能计算风成浪并较好地模拟波浪在植被场中的衰减
CGWAVE	美国迈阿密大学和美国陆军水道实验站	椭圆形缓坡方程	反射和消波边界的处理不够完善,不能考虑风应力,运算时间长
MIKE21-BW	丹麦 DHI 机构	Boussinesq 方程	能计算船行波、海啸、滑坡引起的波浪,不能计算风生浪

防浪林的消浪性能计算多采用消浪系数表示。消浪系数是指经防浪林削减的波高(来波波高与经防浪林削减后波高的差值)与无防浪林时的来波波高的比值,反映防浪林对波高的削减程度。消浪系数越大表明防浪林的消浪效果越好。章家昌公式^[11]适用于刚性植物波浪衰减定量计算,能分别计算树干和枝叶的消浪系数,且嫩江干流刚性防浪林相关参数值在其适用范围之内。傅宗甫公式^[12]为柔性植物的消浪系数计算提供了依据。两公式对防浪林消浪系数的计算值与已有资料值的误差绝大部分在20%以内。因此,选取章家昌公式和傅宗甫公式对防浪林消浪效果进行定量计算和分析。

当防浪林为刚性植物时,防浪林的消浪性能计算采用南京水利科学研究院章家昌公式;当防浪林为柔性植物时,消浪性能计算采用河海大学傅宗甫公式。

3 防浪林消浪影响因素分析

以嫩江干流东阳堤防为例进行方案设计。采用控制变量法设计不同因素变化对防浪林消浪效果的影响程度时,以其现状值作为背景值,即刚性植物防浪林排列方式为等边三角形,防浪林宽度为10 m,行株距为2 m,树干半径和树冠半径采用实地调研实测数据,分别取为0.05 m和0.75 m。当设计来水频率为50年一遇时,洪水水深为2.08 m,淹没到树冠位置;研究区风区长度为5 300 m,计算风速为11.87 m/s(风速数据采用黑龙江省气象局编制气象资料的风速资料,计算风速采用汛期多年平均最大风速值的1.5倍),风向为东南,与法线夹角为5°;平均波高为0.27 m,平均波周期为2.30 s,波长为7.71 m。设计方案思路如图2所示。

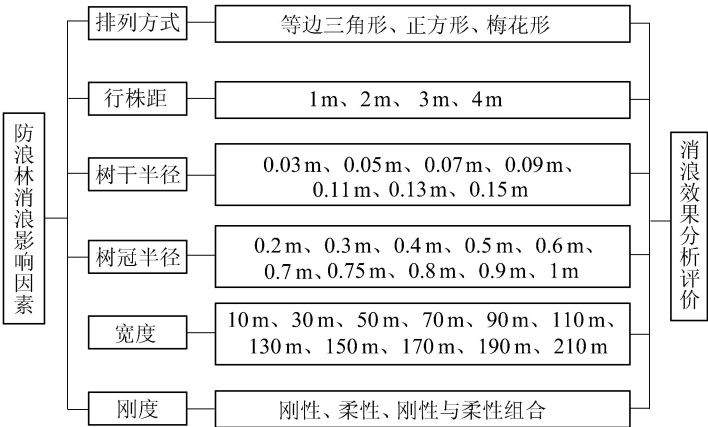


图2 试验工况设计

Fig.2 Design of the experimental conditions

3.1 防浪林排列方式对消浪效果的影响

3.1.1 种植宽度相同时不同排列方式的消浪效果

按照等边三角形、正方形、梅花形排列方式设计不同情景方案。种植宽度为10 m时,不同排列方式下的情景设计方案及模拟结果如表2所示。对刚性植物而言,当行株距为2 m时梅花形排列方式的林木树冠生长会受到阻碍,树冠的最大半径只能达到0.71 m。

表2 防浪林种植方式对消浪效果的影响

Table 2 Effect of planting patterns on the wave dissipation

排列方式	树冠半径/m	相同种植方式的消浪效果		相同种植棵数(28棵)的消浪效果		相同种植面积(36 m ²)的消浪效果	
		种植宽度/m	消浪系数/%	种植宽度/m	消浪系数/%	种植宽度/m	消浪系数/%
等边三角形	0.75	10	34.20	12.12	41.13	5.2	13.23
正方形	0.75	10	32.63	12.00	39.18	6.0	15.94
梅花形	0.71	10	38.82	7.00	26.10	6.0	20.99

注:设计来水频率为2%,种植刚性植物,行株距为2 m,树干半径为0.05 m。

由表2可以看出,种植宽度及行株距相同时,梅花形与等边三角形排列方式的防浪林消浪效果比正方形好。梅花形消浪效果最好,消浪系数比等边三角形的大4.62%,比正方形的大6.19%。但是梅花形排列方式下,行株距较小时不仅会影响树冠生长,而且会影响泄洪。

3.1.2 种植棵数相同时不同排列方式的消浪效果

按照不同排列方式的防浪林种植棵数都为28棵进行方案设计,模拟结果如表2所示。此时的防浪林种植布局图如图3(a)所示。由表2看出,等边三角形的消浪系数比梅花形的大15.03%。防浪林种植棵数相同时,等边三角形排列方式的消浪效果最好,正方形次之,梅花形的消浪效果最差。

3.1.3 种植面积相同时不同排列方式的消浪效果

在36 m²的面积上分别按不同排列方式种植防浪林,不同排列方式下的情景设计方案及模拟结果如表2

所示。此时的防浪林种植布局图如图 3(b) 所示。由表 2 看出,梅花形的消浪系数比等边三角形的大 7.76%。防浪林种植面积相同时,梅花形排列方式的消浪效果最好,正方形次之,等边三角形的消浪效果最差。

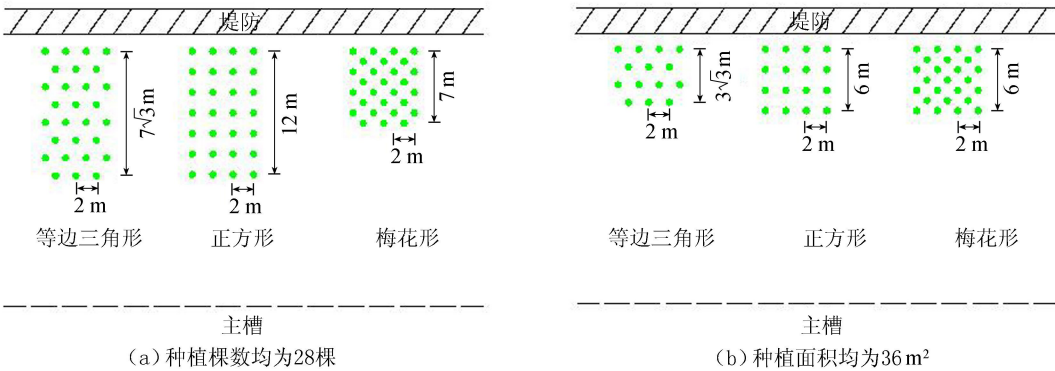


图 3 防浪林布局
Fig. 3 Layout of the wavebreak forest

3.2 防浪林行株距对消浪效果的影响

基于东阳堤防防浪林种植现状与规划,分别设计行株距为 1 m、2 m、3 m、4 m 的情景方案,行的方向与水流方向平行,得到消浪系数随防浪林行株距的变化如图 4 所示。需要注意的是等边三角形和正方形排列方式下,当行株距为 1 m 时,林木种植过密,不仅会影响到洪水下泄,树冠生长也会受到阻碍,树冠的最大半径只能达到 0.50 m。梅花形排列方式下,当行株距为 1 m 时树冠最大半径只能达到 0.35 m,当行株距为 2 m 时树冠最大半径只能达到 0.71 m。

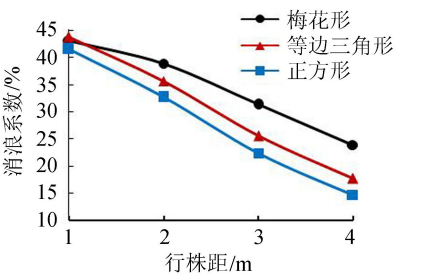


图 4 消浪系数随防浪林行株距变化
Fig. 4 Variation of the wave dissipation coefficient with row spacing

由图 4 可以看出,排列方式相同时,消浪系数随防浪林行株距的增加而减小,但行株距不宜过小,过小既影响树冠的生长,又影响泄洪。当行株距为 1 m 时的消浪系数比 4 m 时大 20% ~ 27%;当行株距的变化为 1 m 时,消浪系数的变化为 5% ~ 10%。因此,可以选择行株距为 1.5 ~ 2 m。行株距相同时,梅花形排列方式的消浪效果最好,等边三角形排列方式次之,正方形排列方式的消浪效果最差。

3.3 防浪林树干半径对消浪效果的影响

东阳堤防现有防浪林树干半径平均为 0.05 m,在设计情景方案时,可分别按 0.03 m、0.05 m、0.07 m、0.09 m、0.11 m、0.13 m、0.15 m 的树干半径进行设计,并分别采用等边三角形、正方形、梅花形排列方式组合出不同的方案进行模型模拟,得到消浪系数随防浪林树干半径变化情况(图 5(a))。

由图 5(a)可以看出,排列方式相同时,消浪系数随防浪林树干半径的增加而增大。当树干半径大于 0.09 m 时,消浪系数的增长率变得极为缓慢。树干半径相同时,梅花形排列方式的消浪效果最好,等边三角形排列方式次之,正方形排列方式的消浪效果最差。

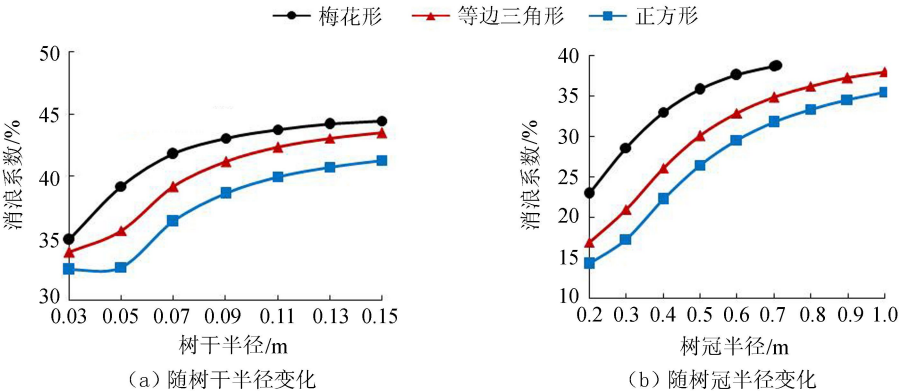


图 5 消浪系数随防浪林树干半径及树冠半径变化情况
Fig. 5 Variation of the wave dissipation coefficient with stem radius and crown radius

3.4 防浪林树冠半径对消浪效果的影响

东阳堤防现有防浪林树冠半径平均为0.75 m,在设计情景方案时,可分别按0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m、0.7 m、0.75 m、0.8 m、0.9 m、1 m的树冠半径进行设计,并分别采用梅花形、正方形、等边三角形排列方式组合出不同的方案进行模型模拟。行株距为2 m时,对于梅花形排列方式,树冠半径最大只能达到0.71 m。消浪系数随防浪林树冠半径的变化情况如图5(b)所示。

由图5(b)可以看出,排列方式相同时,消浪系数随防浪林树冠半径的增加而增大。树冠半径相同时,梅花形排列方式的消浪效果最好,等边三角形次之,正方形排列方式的消浪效果最差。

3.5 防浪林宽度对消浪效果的影响

防浪林能减轻和抵御汛期风浪、急流对禁脚和堤身的冲刷损坏作用,其配置要因地制宜,因害设防,既要考虑满足防护需要,又要考虑满足泄洪需要^[18]。目前研究中多认为防浪林宽度为10~50 m为宜。当防浪林宽度大于水面宽的1/5时会严重阻水,降低了泄洪能力,对防汛不利。根据拟研究堤段的实际情况,防浪林带宽度按10~210 m设计,按照设置的不同情景方案模拟得出不同宽度下刚性植物防浪林消浪效果变化情况如图6所示。

由图6可以看出,刚性植物的消浪系数先随着宽度的增加而增大较快,当防浪林宽度增加到50 m左右时,消浪系数的增加逐渐变为缓慢。当林带宽度大于50 m时,消浪系数增长率逐渐变小;防浪林宽度大于110 m时,消浪系数几乎不再增长,为93%左右。因此认为防浪林宽度在30~50 m之间较合适。防浪林宽度相同时,梅花形排列方式的消浪效果最好,等边三角形排列方式次之,正方形排列方式的消浪效果最差。

3.6 防浪林刚度对消浪效果的影响

刚性植物对防浪林消浪效果的影响在前文中已作讨论,下面仅对柔性植物及刚柔混合两种情景进行讨论。其中,刚柔混合情景,根据柔性植物对波浪削减后的波高,由波浪要素计算公式可计算得到传播到后续刚性植物的波长,然后再进行刚性植物的消浪计算。

3.6.1 柔性植物宽度对防浪林消浪效果的影响

柔性植物在现有研究中多以芦苇、芦竹、杞柳、菖蒲等为案例。由于柔性植物一般外形较刚性植物矮小,多密植,因此研究柔性植物防浪林消浪效果的影响时,主要考虑柔性植物的种植宽度对消浪效果的影响,如图6所示。可以看出,与刚性植物一样,柔性植物的消浪系数随着林带宽度的增加而增加。当林带宽度从10 m增加到30 m时,消浪系数增加了19.25%;当防浪林宽度大于110 m时,宽度每增加20 m,消浪系数的增长量为2.12%~5.64%。相同种植宽度下,刚性植物的消浪效果比柔性植物好。

3.6.2 刚性与柔性植物组合情形对防浪林消浪效果的影响

用 h_0 、 h_1 、 h_2 分别表示柔性植物的高度、刚性植物树冠最低处的高度及刚性植物的高度。以东阳堤防为例,其他因素不变,讨论柔性植物和刚性植物种植宽度都为10 m时的情况。(a)若 $h_0 < h_1 < h_2$ (见图7(a)),防浪林的消浪系数随着洪水位的上升由27.16%先减小为15.68%,然后增加到34.20%。这是由于当洪水发生时,随着洪水位的上涨,最先起消浪作用的是柔性植物和刚性植物树干。随着洪水位继续上涨,当水深位于 h_0 和 h_1 之间时,由于柔性植物被淹没,消浪系数开始减小。随着洪水位再次上涨,水深位于 h_1 和 h_2 之间时,树冠也起到了消浪作用,消浪系数增加。(b)若 $h_1 < h_0 < h_2$ (见图7(b))防浪林的消浪系数随着洪水位的上升由27.16%先增加到44.87%,然后又减小为34.20%。这是由于当洪水发生时,随着洪水位上涨,最先起消浪作用的是柔性植物和刚性植物树干。随着洪水位继续上涨,当水深位于 h_1 和 h_0 之间时,树冠也起到了消浪作用。随着洪水位再次上涨,水深位于 h_0 和 h_2 之间时,柔性植物被完全淹没,消浪系数开始减小。

与 $h_0 < h_1 < h_2$ 相比, $h_1 < h_0 < h_2$ 时防浪林的整体消浪效果较好。当种植宽度相同时,刚性植物的消浪效果较柔性植物好,且消浪时间持久。因此,东阳堤防适合营造以刚性植物为主的防浪林,同时可以种植柔性植物以提高洪水低水位时的消浪效果。当刚性植物与柔性植物混合种植时,消浪效果会因为刚性植物与柔性

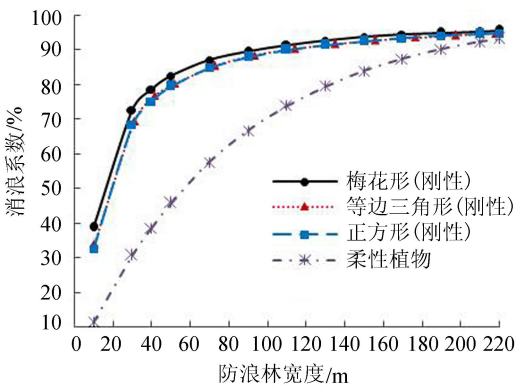


图6 不同宽度下防浪林消浪效果变化

Fig.6 Variation of the wave dissipation effect under different widths

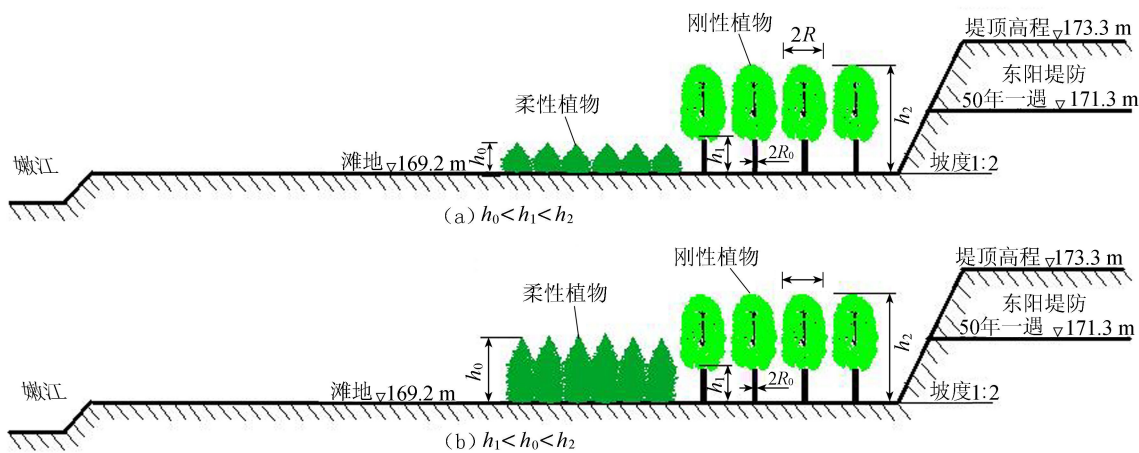


图 7 防浪林种植示意图
Fig. 7 Sketch of the wavebreak forest planting

植物所占的比例不同而有所差别,因此在讨论柔性植物和刚性植物组合情况下的防浪林消浪效果的关键在于要掌握柔性植物和刚性植物树干、树冠的高与水深的大小关系以及刚性植物与柔性植物种植宽度所占的比例。

4 结 论

- a. 刚性防浪林种植宽度相同时,按梅花形种植的消浪效果最好。种植面积相同时,梅花形布置的消浪效果虽然最好,但是种植棵数最多。种植棵数相同时,等边三角形排列方式的消浪效果最好,正方形次之,梅花形消浪效果最差。综合考虑消浪效果和经济成本时,应选择等边三角形排列方式。
- b. 防浪林消浪效果随宽度、树干半径、树冠半径的增大而增大,随行株距的增大而减小。因此,选择和种植林木时不仅要考虑其树干和树冠大小,而且要对防浪林加强管理,定期进行修剪。
- c. 相同宽度下,刚性防浪林一般比柔性防浪林消浪效果好,且消浪时间更持久。可根据不同堤段的保护目标选择对应的刚性植物与柔性植物组合方式,因地制宜确定防浪林的种植结构。
- d. 柔性植物只在洪水低水位时起到消浪作用,而刚性植物在洪水低水位和洪水高水位时均起到消浪作用,并且当柔性植物的高度大于刚性植物树冠最低处的高度时,整体消浪效果更好。

参考文献:

[1] 张茂章,宋正明. 不同林相结构防浪林的消浪性能计算[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(6): 40-43. (ZHANG Maozhang, SONG Zhengming. Calculation on wave dissipation performance for different wave break forest structures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(6): 40-43. (in Chinese))

[2] 刘达,黄本胜,邱静,等. 华南沿海防浪林带种植宽度对消浪效果影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(9): 109-114. (LIU Da, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Experimental study on impact from planting width of coastal wavebreak forest zone in South China on its wave absorbing effect [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(9): 109-114. (in Chinese))

[3] 李锡泉,吴敏,汤玉喜. 洞庭湖区防浪林林分林冠结构的研究[J]. 湖南林业科技, 2007, 34(1): 5-7. (LI Xiquan, WU Min, TANG Yuxi. Study on the forest stand and canopy construction of wavebreak forest in Dongting Lake area [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2007, 34(1): 5-7. (in Chinese))

[4] 颜学恭,曾祥培,徐德新. 长江中游防浪林消能效益分析与研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(3): 52-54. (YAN Xuegong, ZENG Xiangpei, XU Dexin. Investigation on energy dissipation benefit of wind-wave protection forests in middle reach of Changjiang River [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(3): 52-54. (in Chinese))

[5] 苗长运,谢军,阎国杰. 黄河下游防浪林防护效果分析[J]. 人民黄河, 1998, 20(6): 9-10. (MIAO Changyun, XIE Jun, YAN Guojie. The analysis of protection effect of wavebreak forest in the Yellow River downstream [J]. Yellow River, 1998, 20(6): 9-10. (in Chinese))

- [6] 凌海如. 护堤防浪林带规划与营林方法探讨[J]. 水利水电技术, 1981, 12(4): 53-54. (LING Hairu. Discussion on planning and management method of wavebreak forest protecting embankment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1981, 12(4): 53-54. (in Chinese))
- [7] 张静波, 姜厚竹, 张继民, 等. 嫩江干流典型省界缓冲区水质状况分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 97-100. (ZHANG Jingbo, JIANG Houzhu, ZHANG Jimin, et al. Analysis of water quality in typical boundary buffer of Nenjiang River mainstream [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 97-100. (in Chinese))
- [8] 李广毅, 高国雄, 尹忠东. 国内外关于防护林体系结构研究动态综述[J]. 水土保持研究, 1995, 2(2): 70-78. (LI Guangyi, GAO Guoxiong, YIN Zhongdong. Summary on the domestic and foreign dynamic research of protection forest system structure benefit [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1995, 2(2): 70-78. (in Chinese))
- [9] KASSI C R, STEPHEN M H, JULIA C M. Wave dissipation by flexible vegetation [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(18): 1029-1033.
- [10] 赵东梁, 韩梅, 喻国良. 浮式植物体消浪效果的试验研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 53-57. (ZHAO Dongliang, HAN Mei, YU Guoliang. Experimental study on effectiveness of floating vegetation on wave dissipater [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5): 53-57. (in Chinese))
- [11] 章家昌. 防波林的消波性能[J]. 水利学报, 1966, 4(2): 49-52. (ZHANG Jiachang. Wave absorption performance of wind-wave protection forests [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1966, 4(2): 49-52. (in Chinese))
- [12] 傅宗甫. 互花米草消浪效果试验研究[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(5): 45-47. (FU Zongfu. Experimental study on the effect of dissipating waves about smooth cord-grass [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1997, 17(5): 45-47. (in Chinese))
- [13] 刘海成. 近岸波浪变形数值模型的比较研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [14] HOLTHUIJSEN L H, HERMAN A, BOOIJ N. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models [J]. Coastal Engineering, 2003, 49: 291-305.
- [15] MADSEN P A, MURRAY R, SORENSEN O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics [J]. Coastal Engineering, 1991, 15(4): 371-388.
- [16] 曹海锦, 冯卫兵. 人工柔性植被场中波浪衰减特性研究[J]. 海洋工程, 2014, 32(3): 36-44. (CAO Haijin, FENG Weibing. Study on the characteristic of wave dissipation by artificial flexible vegetation field [J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(3): 36-44. (in Chinese))
- [17] 施露, 董增川, 付晓花, 等. Mike Flood 在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 351-358. (SHI Lu, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Application of Mike Flood to analysis of flood and waterlogging risks of medium and small rivers. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(4): 351-358. (In Chinese))
- [18] 王高德. 汉江潜江段防浪林带营造技术与效益分析[J]. 湖北林业科技, 2014, 43(4): 56-57. (WANG Gaode. Anysis of technology and benefit of wavebreak forest of Qianjiang section of Hanjiang River [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2014, 43(4): 56-57. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-01-14 编辑: 高建群)