



大自然如何抵御海平面上升，保护人类？

Rosanna van Hespen^{1,2*}, Celine E. J. van Bijsterveldt^{1,2,3}, Carolina M. L. Camargo^{1,4}, Marte M. Stoorvogel^{1,2} 和 Tjeerd J. Bouma^{1,2}

¹荷兰皇家海洋研究所, 河口与三角洲系统研究部 (荷兰, 耶尔瑟克市)

²乌得勒支大学, 自然地理学院地理科学系 (荷兰, 乌得勒支市)

³瓦赫宁根大学, 水生态与水质管理 (AEW) (荷兰, 瓦赫宁根市)

⁴代尔夫特理工大学, 地理科学与遥感系 (荷兰, 代尔夫特市)

少年审稿人



HELENA,
MOMO, AND
TATI

年龄: 10-11

河流三角洲 (River delta)

河流注入海洋的低洼地区。著名的三角洲包括地中海的尼罗河三角洲和墨西哥湾的密西西比三角洲。

地球上近三分之一的人口沿海而居, 面临着洪水侵袭的风险。沿海地区通常修筑海堤等防洪设施来阻挡洪水。如今, 随着全球气候变化, 海平面上升和暴风天气等现象频频发生、愈演愈烈, 增加了洪水风险。因此, 我们得建造更大的防洪设施, 阻挡洪水侵袭, 但这些设施的造价非常昂贵。我们是否还有其他选择? 这个答案或许会让你大吃一惊——大自然可以帮助我们摆脱困境。纵观全球, 红树林、盐沼和珊瑚礁等生态系统可以帮助我们保护海岸, 抵御洪水。它们能够使海岸的生态环境变得更加干净自然, 改善生物多样性, 也能使海岸线更加安全稳固。这些防洪系统都以大自然为基础, 我们将在本文中介绍它们是如何发挥作用的。

为什么要防止海平面上升?

海滨是理想的生活之地。全球有三分之一的人口生活在沿海地区, 这些地区既包括小渔村, 也包括纽约、上海等大都市, 又或者荷兰这样的沿海国家, 其中不少地方位于河流三角洲, 也就是河流注入大海的地方。三角洲是发展港口、农业和渔业的沃土, 但地势低洼, 易受洪水泛滥。举例来说, 荷兰有一半面积在海平面以下数米, 如果荷兰的防洪措

海平面变化 (Sea-level change)

各地区海平面的变化各不相同,有些地方甚至会出现海平面下降。海平面也不会一直上升。但从保护海岸的角度来看,我们需要密切关注海平面上升。

图 1

(A) 相对海平面上升是由地面下沉和海平面升高共同引起的。(B) 波浪分为水上和水下部分,水下部分撞到屏障时就会坍塌,整个波浪随之破碎。

地面沉降 (Land subsidence)

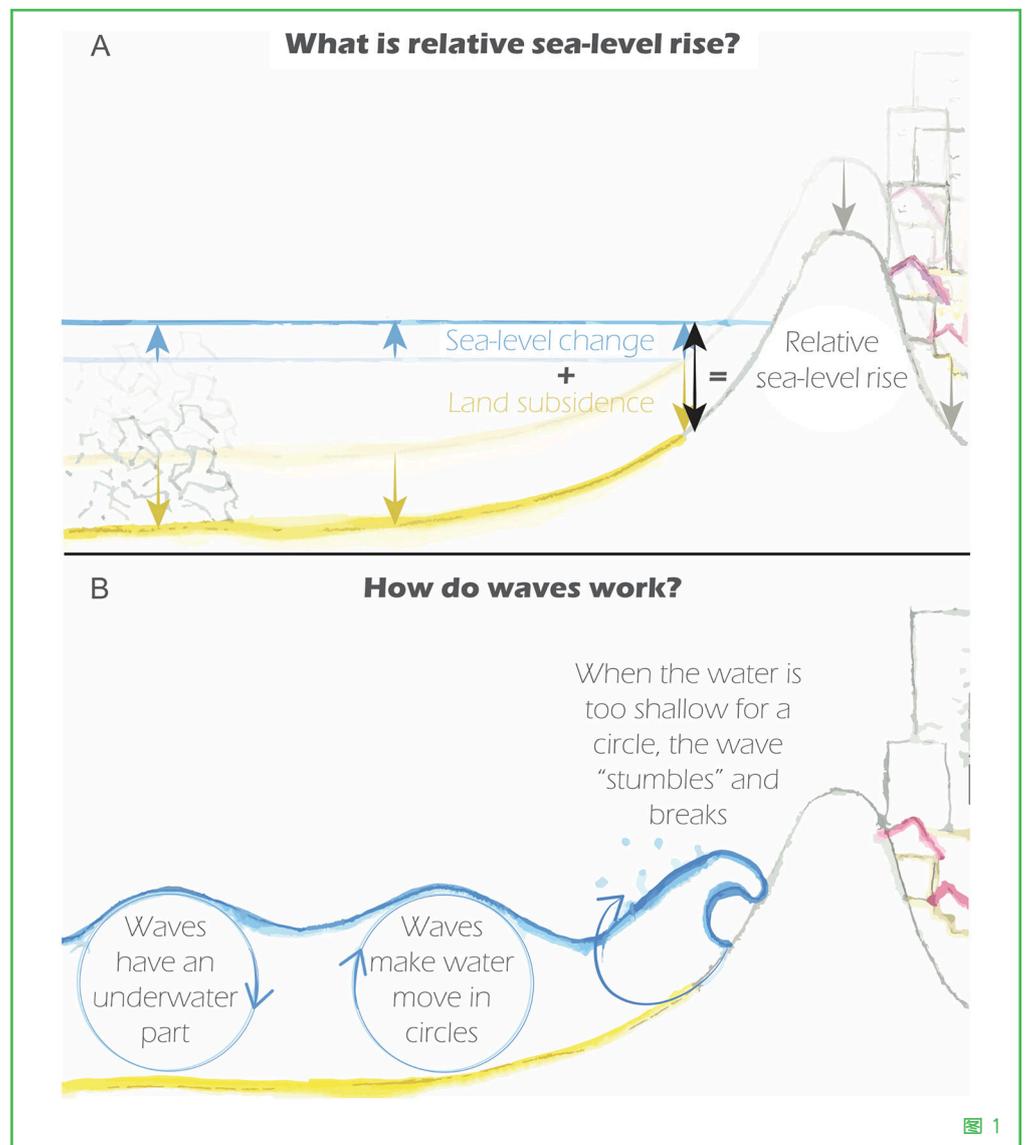
沿海城市地面下沉。如果我们抽取地下水、开采地下天然气和石油,加上大楼和房屋的重压,压实地下空隙,沿海城市就会下沉。

相对海平面上升 (Relative sea-level rise)

相对海平面上升是地面下沉和海平面上升共同导致的结果,会增加仅由海平面上升带来的洪水风险。

施不起作用的话,这些地区就早已被洪水淹没了!生活在沿海地区有一定风险,气候变化及随之而来的海平面变化、暴雨增多增强等后果更是加剧了这类风险。

全球气温持续上升,南极洲和格陵兰岛的冰川和冰盖不断融化,流入海洋,导致海平面升高。同时,海洋吸收大气中的部分热量,使得水温升高,受热膨胀,加剧了海平面升高。不仅如此,有些城市的地面还在下沉,主要因为开采地下水、石油或天然气,同时大楼和房屋的重压不断向土壤施压,压实地下的空隙,这种现象被称为地面沉降。在一些城市中,地面沉降造成水位每年上升超过 10 厘米,加剧海平面上升带来的威胁!地面沉降和海平面升高共同作用导致相对海平面上升(图 1A) [1],增加了沿海地区的洪水风险。



气候变化除了导致相对海平面上升,还会增加暴风发生的频率和程度。猛烈的暴风把越来越多的海水吹向海岸,使海平面在相对升高的基

础上进一步抬高，那么到达海岸的波浪也越来越高。具体是怎么造成的呢？波浪由水面部分和水下部分组成（图 1B），水下部分撞击到海底或人造屏障时通常会倒塌，整个波浪随之破碎，这种现象在沙滩上就能观察到。但是，当水位过高时，波浪不会破碎，而是保持原来的大小。如此之大的海浪加上暴风会引发洪水，损坏房屋，有时甚至威胁生命。那我们如何应对海平面上升带来的影响呢？

灰色防洪基础设施 (Gray flood defenses)

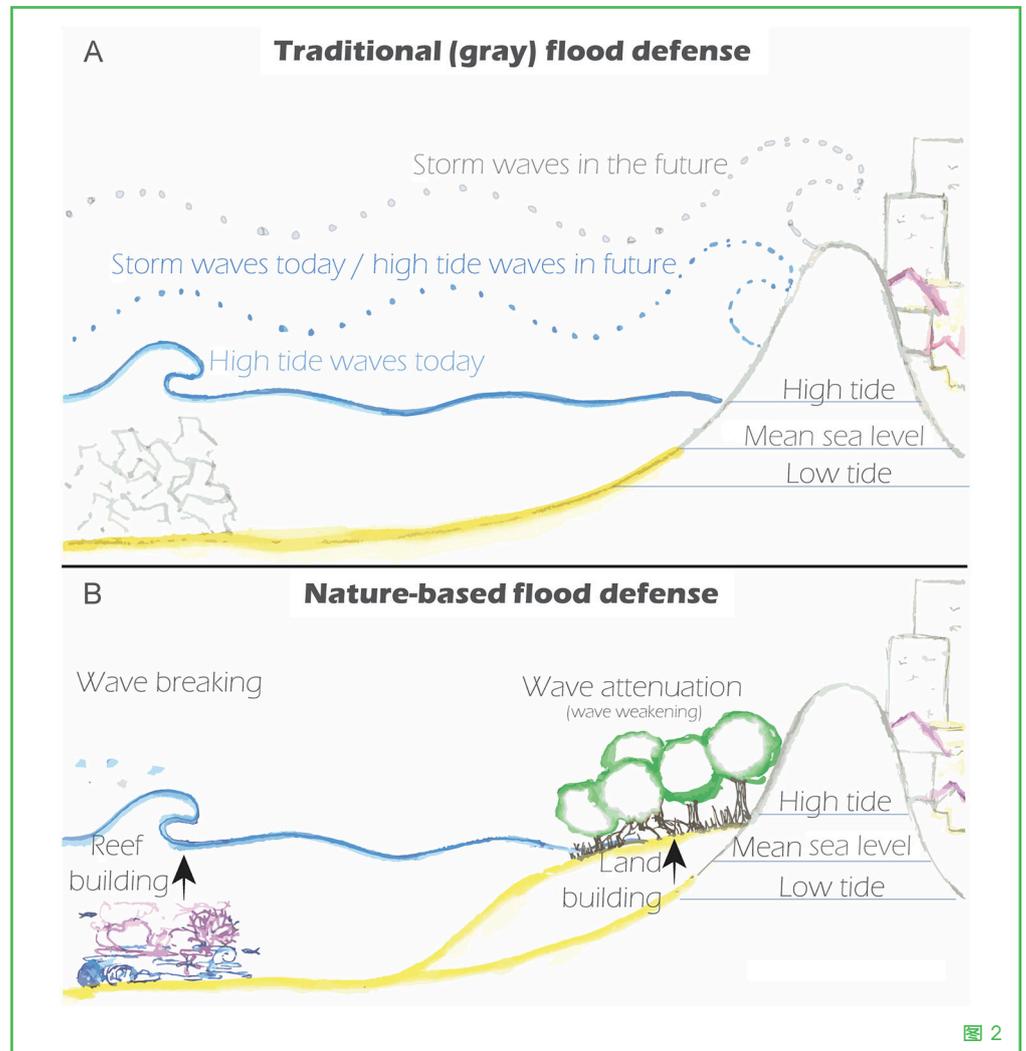
是指保护海岸的混凝土建筑结构，包括堤坝、海堤和防波堤。

有必要改进防洪基础设施吗？

用来保护沿海城市的混凝土建筑结构通常称为**灰色防洪基础设施**（图 2A），包括堤坝、海堤和防波堤。防波堤是大海中凸起的屏障，能够阻挡波浪对海岸的冲击。

图 2

(A) 传统的灰色防洪设施能够阻挡波浪和洪水侵袭陆地，但相对海平面上升削弱了灰色防洪设施的作用。(B) 绿色防洪设施利用生态系统来保护海岸，因地制宜运用特定的动植物来发挥功效（见图 3）。



波浪的水下部分撞到这一屏障就会失去部分能量，就像跑步时被马路牙子绊倒。堤坝或海堤是岸上的屏障，能够阻挡洪水侵袭陆地，尤其是在暴风和巨浪同时出现，水位高于正常水平时起到保护作用。

绿色防洪系统 (Nature-based flood defense)

这类防洪设施结合混凝土工程结构和盐沼或珊瑚礁等沿海生态系统来防御洪水。

生态系统 (Ecosystem)

由动植物构成的各不相同的自然系统,例如亚马逊雨林、大堡礁,或你们当地的森林。

图 3

分布在世界各地的沿海生态系统提供了基于自然的防洪措施。每张圆形图片的边框颜色对应地图上不同的区域。盐沼和贝类礁主要分布在温带地区,而红树林和珊瑚礁则分布在热带地区 [图片来源: Jildou Schotanus (贻贝礁), Marte Stoorvogel (盐沼) 和 Celine van Bijsterveldt (珊瑚礁和红树林)]。

灰色防洪设施的建造是为了抵御强烈的风暴,但随着海平面上升,它们的作用非常有限。就防波堤而言,在海平面上升的情况下,它的效果越来越弱,因为波浪的水下部分达到一定高度时,就不再撞击而是越过防波堤,打在岸上(图 2A)。堤坝和海堤的效果也越来越差,如果相对海平面上升幅度过大,水位就会高于屏障,屏障背后的陆地就会遭受海水泛滥。猛烈的波浪和暴风也会摧毁堤坝和海堤,削弱这类设施发挥的作用。在土地沉降、海平面上升、暴风加剧的背景下,我们需要更高更强的防洪设施,但建设成本巨大。我们能否利用生态系统来保护海岸线呢?这种方式就叫做绿色防洪系统(图 2B) [2]。

自然如何帮助我们抵御相对海平面上升

我们可以运用世界各地的沿海生态系统打造基于自然的防洪设施。这样的生态系统包含红树林和盐沼植物,以及由牡蛎、贻贝和珊瑚等动物构成的类似于防波堤的珊瑚礁(图 3)。这些动植物能够适应在咸咸的海水中生活。有些可以通过减缓海浪的速度来阻挡洪水,有些能够形成一片陆地来保护我们,还有一些可以同时具有这两种本领呢!

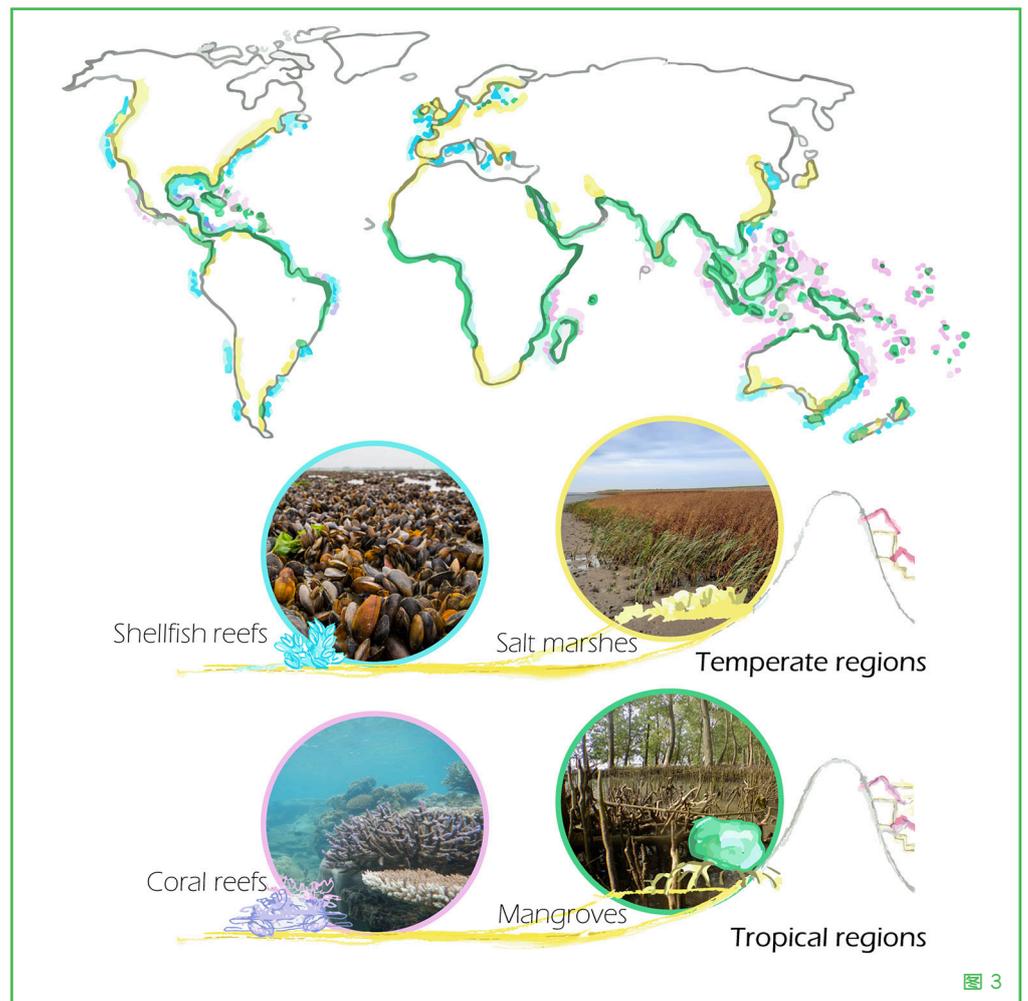


图 3

生长在海岸附近的珊瑚礁不仅漂亮，还很坚固。珊瑚礁的生长地点与灰色混凝土防波堤的位置非常相似，发挥作用的方式也别无二致，它们都是通过形成水下隆起的屏障来阻断波浪（图 2B）。

牡蛎和贻贝可以构筑贝类礁，像珊瑚礁一样阻断波浪。虽然礁体和灰色防波堤通过类似的途径保护海岸，但礁体可以不断生长哦！它的生长速度能够跟上海平面上升的幅度，并且保持足够的高度来不断击碎波浪，而防波堤则需要人工维护。

红树林和盐沼一般生长在堤坝和海堤朝向大海的一侧，对抵御洪水非常有利，因为它们可以在波浪抵达灰色防洪设施之前减小波浪的规模。涌入红树林（或盐沼）的波浪会遇到许许多多的障碍物。每次撞击到一颗植物，波浪就会损耗一点能量，威力就会削弱。当波浪不断撞击盐沼或红树林中所有植物，就会消耗很多能量，变得越来越小。这种现象叫做**波衰减**。如果红树林或盐沼足够大，就能极大地削减波浪的高度。有了它们的帮助，我们只需要建造小一些的堤坝，还能省下很多钱！

波衰减 (Wave attenuation)

每次撞击到一个植物，波浪就会损耗一点能量，威力就会削弱。当波浪不断撞击盐沼或红树林中所有植物，就会消耗很多能量，变得越来越小。

红树林和盐沼也可以让它们生长的土地长高。没有这些植物的话，海水的流速会变得非常快，把泥沙一起卷走。但是当海水流过沿海植物时，它会减慢速度，泥沙颗粒就会沉入土壤。久而久之，土面就会越来越高。

这样，地面的升高就能跟上海平面上升的幅度 [3]，有红树林或盐沼的地区出现洪水的频率也会有所降低。红树林和盐沼喜欢生长在洪水较少的地方，它们在那里不断建造陆地，使土面持续升高。升高的土面充当了防波堤，守护着海岸 [4]。

滨海生态系统具有更多优势

滨海生态系统不仅能提供基于自然的防洪措施，还有许多其他优势。正如前文所述，沿海生态系统土面的升高能够跟上海平面的升高 [5]。由此可见，它们在防洪方面的成本非常低，因为他们不像灰色防洪设施一样需要很多维护。这些生态系统还能储存大量碳，有助于降低大气中的二氧化碳含量。较低的二氧化碳含量意味着气候变化幅度降低，海平面上升幅度也随之降低。此外，这些生态系统为珍稀动植物提供了理想的栖息地，保护了生物多样性。沿海生态系统也为人们休闲旅游提供了优美的环境！

但是，滨海生态系统在过去 50 年中不断缩减。科学家们正在研究如何保护和修复这些生态系统，而了解生活在那里的动植物有哪些偏好有助于我们开展这项工作。它们对洪水发生的频率有怎样的倾向？它们能否应对一次次的波浪？水的含盐量多少比较合适？我们对这些动植物了解得越多，就能更好地保护沿海生态系统——它们也就能更好地帮助我们抵御洪水！

综上所述，随着海平面上升，维护灰色防洪设施的成本将非常昂贵。沿海生态系统也可以击碎海浪，甚至建造陆地，让陆地变得和海平面一样高。沿海生态系统通过这种方式保护世界各地的海岸，抵御洪水的侵袭。你也可以通过各种方式守护海岸。首先，如果你对这个话题深感兴趣，可以阅读更多论文，例如[海平面变化](#)、[全球海洋与气候变化](#)、[海草](#)等发表在 *Frontiers for Young Minds* 上的文章。你也可以在学校进行演讲展示，向同学介绍基于自然的防洪措施。如果想要学习更多知识，你还可以联系本地科学家，与他们在线下或线上见面，比如通过 [Skype a Scientist](#) 和 [Letters to a Pre-Scientist](#) 等平台。最后，如果你想成为一名科学家，就需要学习更多的生物、数学和物理知识！也许有一天你就能探索出全新的系统来践行基于自然的防洪措施！

作者贡献

RH、CB、CC 及 MS 共同参与了本文的构思和写作，RH 负责项目的协调工作，CB 在 TB 的协助下进行图表设计，RH、CB、CC、MS 及 TB 参与了稿件的修改、阅读和审定。

致谢

荷兰科学研究组织（编号 ALWSD.2016.026）、国家自然科学基金（编号 51761135022）及工程和物理科学研究委员会（编号 EP/R024537/1）共同为 RH 在“三角洲可持续性”领域的联合研究项目提供资助。荷兰科学研究组织应用与工程科学领域委员会、来自 Boskalis 公司的专家、Van Oord 公司、Deltares 研究机构、Witteveen+Bos 公司及 Wetlands International 公司均为 CB 的“BioManCO”项目（项目编号 14753）提供资助。荷兰空间局为 CC 提供了资助（拨款编号 ALGW0.2017.002）。荷兰科学研究组织为 MS 的 Hedwige-Prospere 围垦地试验项目提供资助（编号 175890）。TB 的“可持续堤坝项目”（编号 NWA.1292.19.257）已获得资助。

参考文献

1. Nicholls, R. J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A. T., Meyssignac, B., et al. 2021. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nat. Clim. Change* 11:338–42. doi: 10.1038/s41558-021-00993-z
2. Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M., and Ysebaert T De Vriend, H. J. 2013. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*. 504:79–83. doi: 10.1038/nature12859
3. Kirwan, M. L., Guntenspergen, G. R., D'Alpaos, A., Morris, J. T., and Mudd, S. M., Temmerman. 2010. Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. *Geophys. Res. Lett.* 37:23. doi: 10.1029/2010GL045489

4. Vuik, V., Jonkman, S. N., Borsje, B. W., and Suzuki, T. 2016. Nature-based flood protection: the efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes. *Coastal Eng.* 116:42–56. doi: 10.1016/j.coastaleng.2016.06.001
5. Zhu, Z., Vuik, V., Visser, P. J., Soens, T., van Wesenbeeck, B., van de Koppel, J., et al. 2020. Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence. *Nat. Sust.* 3: 853–62. doi: 10.1038/s41893-020-0556-z

线上发布: 2023 年 11 月 10 日

编辑: Renato Somma

科学导师: Karen Holmberg

引用: van Hespen R, van Bijsterveldt CEJ, Camargo CML, Stoorvogel MM 和 Bouma TJ (2023) 大自然如何抵御海平面上升, 保护人类? *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2023.910803-zh

英文原文: van Hespen R, van Bijsterveldt CEJ, Camargo CML, Stoorvogel MM and Bouma TJ (2023) How Can Nature Protect People Against Sea-Level Rise? *Front. Young Minds* 11:910803. doi: 10.3389/frym.2023.910803

利益冲突声明: 作者声明, 该研究是在没有任何可能被解释为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下进行的。

版权 © 2023 © 2023 van Hespen, van Bijsterveldt, Camargo, Stoorvogel 和 Bouma. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

少年审稿人



HELENA, MOMO, AND TATI, 年龄: 10–11

他们的三人小组风趣幽默, 热爱科学和写作。他们喜欢探索新的领域, 最吸引他们的话题是如何通过环保途径应对气候危机, 让地球的未来更加美好。Helena 喜欢远足和踢足球, 也很爱自己养的两只猫。Momo 喜欢亲近大自然, 尤其是徜徉城市公园, 因为城市生态系统向她展示了大自然的力量。她有一头蓝头发。Tati 喜欢狗, 具有下水道疏通和建筑领域的出色才能。

作者



ROSANNA VAN HESPEN

我是荷兰皇家海洋研究所 (位于荷兰耶尔瑟克) 的博士生, 喜欢研究大自然。小时候, 我喜欢玩水和泥巴, 悄悄告诉你, 我现在还喜欢呢! 我觉得植物非常厉害, 所以我本科的专业是生物学, 之后获得了生态学的硕士学位。如今我的博士项目主要研究泥滩红树林生态系统, 探索如何利用红树林防洪。*rosanna.van.hespen@nioz.nl



CELINE E. J. VAN BIJSTERVELDT

我是 Celine。我从小就对海洋生物着迷, 喜欢呆在水中和水边。所以, 我开始尝试浮潜, 之后是水肺潜水, 这样就能近距离观察酷炫的海洋生物。在研究的过程中, 我了解到沿海生态系统不仅提供了游览的好去处, 也有很多用处, 例如红树林能够净化水质, 促进鱼类生长繁衍。在荷兰皇家海洋研究所就读博士期间, 我致力于研究红树林生态系统的修复。目前我在瓦赫宁根大学教授海洋生态学, 向未来的科学家和管理人员讲授海洋生态系统非常酷炫的功能。



CAROLINA M. L. CAMARGO

我从小在海边长大, 一直很想了解海洋的运动, 包括海浪、潮汐和海流。于是我决定研究海洋学, 这样我不仅能有更多的时间呆在海上, 也可以深入了解海洋。目前, 作为荷兰皇家海洋研究所的博士生, 我能通过卫星数据研究全球海平面变化的情况和原因。但是这样一来, 我就不能经常去海边了, 不过我希望我的研究能够帮助我们更好地应对海平面上升。



MARTE M. STOORVOGEL

2020 年, 我开始在荷兰皇家海洋研究所攻读博士学位。在此之前, 我获得了瓦赫宁根大学土壤、水和大气专业的学士学位, 以及土壤地理学和地表动力学硕士学位。在学习的过程中, 我开始对土壤发育及其在农业和自然发展方面的应用非常感兴趣。目前我主要研究随时间推移土壤如何变得更加坚固, 以及我们如何利用这一特点抵御海洋的侵袭。



TJEERD J. BOUMA

个人而言, 致力于解决至关重要的社会问题能给我带来能量。因此, 我不仅研究如何保护和修复自然 (以应对生物多样性的丧失), 也研究如何可持续地利用自然来帮助人类发展。在研究以自然为基础的防洪措施时, 我把所有相关主题都结合在一起进行探索。我任职于荷兰皇家海洋研究所和乌得勒支大学, 因而有机会在世界各地开展这类研究。小时候, 我觉得研究工程学和生物学都很好, 所以你从这点可以看出我为什么会喜欢现在的研究领域了吧!