

最近邻河道相对高度及其在中国 洪水淹没制图中的应用*

林婷婷¹⁾ 史培军^{1,2)} 马春英¹⁾ 师凡雅¹⁾ 聂娟³⁾ 陈波^{1)†}

(1)北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,地表过程与资源生态国家重点实验室,100875,北京; 2)青海师范大学高原科学与可持续发展研究院,810016,青海西宁; 3)应急管理部国家减灾中心,100124,北京)

摘要 基于国际上由数字高程模型(digital elevation model, DEM)衍生的最近邻河道相对高度(height above nearest drainage, HAND)概念,采用 STRM DEM 数据派生了中国 1000 和 250 m 水平分辨率的 HAND 数据集,并将 HAND 数据集应用于洪水淹没制图,建立了河道水位相较枯水期上涨 1~10 m 情景下的中国河道型洪水淹没图库。进一步以淮河一级支流淝河 2020 年 7 月大洪水为例,采用遥感提取及 HEC-RAS 计算的淹没范围,验证了基于 HAND 绘制的淹没图。结果表明, HAND 相对于经典的 DEM 能够补充提供局地地形信息,基于 HAND 的淹没制图方法具有可行性和合理性。本文计算的中国 HAND 数据集可为地理学相关领域的研究提供凸显局地特征的地形数据,建立的基于 HAND 的淹没图库可为中国的洪水淹没制图工作及洪水风险管理提供参考。

关键词 最近邻河道相对高度(HAND);淹没制图;局地地形;洪水;水文;数字高程模型(DEM)

中图分类号 K903

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021247

地形是指地球表面的高低起伏形态,高程是描述地表起伏形态最基本的几何量,研究中常借助数字高程模型(digital elevation model, DEM)来定量描述地形^[1-2]。DEM 作为地表形态高程属性的数字化表达^[3],以整个地球表面为单元,描述地表任一位置相对于基准面(常以海平面为 0 基准面)的高度。地球表面的物理过程通常受到地形的控制或强烈影响,自然条件下,不论在山坡还是在河网水系中,水往低处流,其实质就是地形差异导致地表水重力势能空间差异。DEM 给相关领域带来了革命性的影响^[4],特别是水文学。因能够有效表征水流运动的物理机制,水文、生态、地理学等相关领域常基于 DEM 数据,通过填洼、局地坡度与流向、集流等序列计算勾画山坡-沟谷这一自然储水与排水系统,进而描述地表水的分布、运动及变化规律。

尽管 DEM 实现了地形的数字化表达,能够表征大尺度的地形起伏特征,但在描述局地地形信息上较隐晦。水往低处流的“低”更强调局部相对地形,需要通过以局地为参考,从而反映局部环境的地形模型来表达。如在由局地山岭向山谷的水分运动中,一对海平面相对高度均为 1 000 m 的山岭和山谷,其水文(如

地下水埋深、土壤湿度)特征可能完全不同,而另一对海平面相对高度分别为 1 000 与 100 m 的山谷,却可能具有类似的水文特征。正是认识到局部地形对地球表层水运动的重要作用,为了增强海平面相对高度差异明显的山谷在水文学角度的可比性,Rennó等^[5]和 Nobre 等^[6]基于 DEM 提出了一个衍生的、水文意义明确的地形模型 HAND (height above nearest drainage),即最近邻河道相对高度模型。HAND 是以河网水系为参考的局地相对地形,以山坡-沟谷为单元,描述了地表任一位置相对于局部水系的相对高度。由于 HAND 更强调局地地形引起的地表水空间差异,能够反映山坡-沟谷的水流路径,有助于进一步揭示流域水文行为,最初被用于水文过程分析与模拟。多个研究表明:1) HAND 能揭示土壤水分和地下水的空间分布及时间动态与地势之间的关联^[7-11];2)按一定 HAND 阈值分类的地形单元具有相似的水文特征^[12-16]。这些研究推论 HAND 相较于 DEM 更有利于建立局地地形与水文响应之间的关系,为水文模型的建立与优化提供了新思路。

HAND 在山坡-沟谷单元中增强了地形与河网的联系,除了水文学研究还有望应用于洪水淹没制图。

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0604903);应急管理部国家减灾中心主任科研基金资助项目(202028ZZ00);国家自然科学基金资助项目(41501020)

† 通信作者:陈波(1984—),男,副教授。研究方向:地表水文系统与洪水风险评估。E-mail: bochen@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-10-11

河道型洪水是指由暴雨、融雪、冰凌阻塞等自然因素引起水位迅猛上涨、水流从河道临时性漫溢至洪泛区的现象^[17-18]。水位上涨过程中,洪水在局部山坡沿水流路径逆流而上并逐步填充洪泛平原,近似于山坡汇流的逆过程。在河道水位相较于枯水期上涨 1 m 情景下,与枯水期水面高差 < 1 m 的河道邻接区域,即 HAND < 1 m 的区域,将被淹没。由此可见, HAND 可被应用于简易洪水淹没制图。基于 HAND 的淹没模拟本质上是一维模型,相当于通过用河道水深所对应的平面切割 HAND 分布图,初步确定潜在洪泛区以及不可能发生洪水的地方。这个水面线平移切割的实践方案有着广泛的应用:如美国联邦应急管理署(FEMA)第一代洪水危险性图^[19],就是将百年一遇的洪泛区边界叠加到相应区域的等高线地形图上进行平面切割,获得淹没深度等洪水危险性信息;淹没制图方法中平面法,也是通过将一系列平面与地形数据相交割来获得洪水淹没范围,如一维 HEC-RAS 和 CSIRO TVD 模型^[20]等。

淹没图是展示洪水淹没空间范围的专题地图,能为洪水事件期间的应急响应发挥重要作用,也是洪水风险管理的重要基础^[21-23],但我国在大范围淹没制图方面仍有提升空间。我国洪水淹没图编制工作起步较晚,20 世纪 80 年代中期至 90 年代中后期开始探索,1998—2011 年进行试点研究,随后在全国防洪重点地区先行展开^[24-25]。目前中国已编制了重点防洪保护区、中小河流重点河段和重点防洪城市等区域的洪水淹没图,还需进一步扩大洪水淹没制图的范围^[26-29]。由于洪水过程的复杂性、随机性,以及洪水淹没模型的结构、输入数据和验证数据的不确定性,洪水模拟仍是水文和水力学研究中的一个重大挑

战^[30]。迄今为止,尚无具有一致性、高水平分辨率、覆盖广大防洪非重点区的中国河道型洪水淹没图可供使用。

本研究将探索 HAND 计算与基于 HAND 进行洪水淹没制图的方法,以期:1)形成中国 HAND 数据集,为相关领域提供一套更具水文意义的中国地形数据集;2)应用 HAND 数据集绘制不同水深情景下的淹没图,构建中国河道型洪水淹没图库,实现基于水文分析的中国大范围、高水平分辨率的快速洪水淹没制图,为中国广大防洪非重点区域的淹没制图工作提供一种新思路,为洪水风险分析和洪涝灾害的损失评估提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 地形数据 采用 SRTM DEM 地形数据构建中国 HAND 数据集与淹没图库。目前应用广泛且易获取的栅格型 DEM 数据包括 GTOPO30、HYDRO1K、ASTER GDEM、GMTED2010、HydroSHEDS 和 SRTM 等^[31],数据精度如表 1 所示。其中 HydroSHEDS 和 SRTM 的垂直误差相对较小,且水平分辨率能基本满足研究需求,因而优先考虑。HydroSHEDS 是由 SRTM 加工得到的数据产品,其子产品 HydroSHED DEM-CON 更改了原始高程数据,降低了大型河流和湖泊的高程以突显河网,对洪水淹没模拟及制图结果的精确性有不利影响。于 2000 年 2 月 11—22 日采集的 SRTM 原始数据,经过不断的数据质量控制和提升生成的 V4 版本 DEM,是目前能够开放获取、覆盖范围大、精度相对较高的地形数据,在水文学及地理学等相关领域研究中应用广泛,故本研究选用 SRTM 数据集。在允许的情况下,采用更精确的地形数据更佳。

表 1 常用 DEM 数据集的基本信息

数据集	GTOPO30	HYDRO1K	GMTED2010	ASTER GDEM	HydroSHEDS	SRTM
水平分辨率/m	1000	1000	250	30	90	90
垂直绝对误差/m	0~30	0~30	0~30	0~20	0~16	0~16
数据范围	全球	全球	84°N~56°S	83°N~83°S	60°N~56°S	60°N~56°S

限于可用计算资源,本研究采用 1000 和 250 m 2 种水平分辨率的 SRTM DEM 构建中国数字流域,生成无洼地 DEM、流向、河网水系和流域边界等数据,基于数字流域展开 HAND 计算并应用于淹没图库构建。此外还采用合作研究获取的局部区域 12.5 m 水平分辨率的 DEM,以大别山北麓中坡陡流急的山溪性河流毛坦河小流域为例,展示 HAND 分布及淹没图细节。

1.2 最近邻河道相对高度 (HAND) 的定义及计算

HAND 是以河网水系为参考的局部相对地形,数学定义为地表任一位置与其沿水流流程由山坡进入河网处的高程差值,描述了地表任一位置相较于局部水系的相对高度。根据定义,最近邻河道位于坡面汇流路径与河网汇流路径的交叉处,因此 HAND 等于坡面汇流路径起始点的高差,本质上是坡面汇流过程的水头。公式为

$$H_C = E_C - E_{ND}, \quad (1)$$

式中: H_C 为当前点的 HAND 值, E_C 为当前点的海拔高度, E_{ND} 为距当前点最近邻的河道的海拔高度, 此处“最近邻”是指沿汇流路径最近, 而不是直线距离最近. 如图 1 所示, A 为坡面点, 产流沿汇流路径 L 从 B 点进入河道, 则 A 点的最近邻河道为 B 点, 其 HAND 值为

$$H_A = E_A - E_B. \quad (2)$$

显然, 依据式(2)所有河道位置的 HAND 值均为 0.

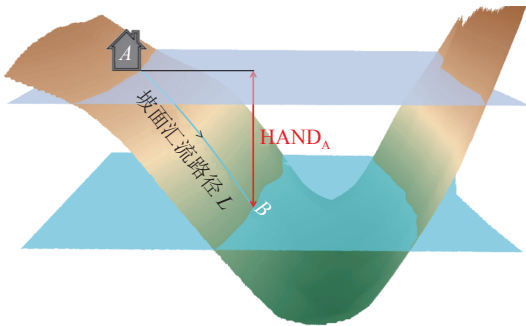


图 1 最近邻河道相对高度的定义示意

计算 HAND 依赖于栅格形式的地形、流向和河网数据. 流向及河网数据通过 GIS 数字流域分析即可算得, 此处不作细致说明. 基于区域 DEM 数据计算 HAND 数据的过程包括河道编号、识别最近邻河道和逐个网格计算 HAND^[32]3 个步骤:

1) 读取栅格形式的河网数据. 图 2-a 例中蓝线为河道栅格, 对每个河道栅格进行编号, 可用 $1 \sim n$ 表示; 图 2-b 例中河道栅格由 1 起始编号到 19, 即 $n=19$. 该编号只是为了区分各河道栅格.

2) 根据流向识别每个栅格的最近邻河道. 若当前栅格为河道栅格, 其最近邻河道即为当前栅格, 且编号不变; 若当前栅格为坡面栅格, 则从其出发, 沿水流方向向下游移动, 首次遇到的河道栅格即为当前栅格的最近邻河道, 遂将当前栅格编号定为首次遇到的河道栅格编号. 遍历完所有栅格后, 坡面位置均能获得最近邻河道的编号, 如图 2-b.

3) 读取无洼地 DEM, 根据最近邻河道相对高度定义逐栅格计算 HAND. 以图 2-b 红框坡面栅格为例, 其高程在图 2-c 无洼地 DEM 中为 77 m, 对应的最近邻河道为编号 10 的黄框河道栅格, 高程为 68 m, 因此该坡面栅格的 HAND 值为 9 m; 图 2-d 展示了每个栅格的海拔高度与相应最近邻河道的海拔高度相减得到的 HAND 矩阵, 河道上的 HAND 值均为 0.

1.3 基于最近邻河道相对高度 (HAND) 的淹没制图

假设在一场洪水事件中, 坡面汇流路径垂直方向上水压平衡, 各坡面汇流路径之间没有横向侧流, 那么洪泛平原上的水面和河道中的水面等高, 此时洪泛平原上低于河道水面高度的位置将被淹没, 借助 HAND 分布以及水位信息便能识别淹没区域以及淹没水深 D . 非洪水时期, 即 DEM 数据采集时, 河道中水面海拔高度为 E_{ND} ; 洪水时期河道水深上涨 D_{ND} , 并漫溢出河道、沿汇流路径溯源流动进入洪泛平原. 此时, 河道及洪泛平原上的水面高程 Z_{ND} 相同且均为

$$Z_{ND} = E_{ND} + D_{ND}. \quad (3)$$

因此, 洪泛平原上洼地区域的淹没水深 D_C 为水面高程 Z_{ND} 与洼地陆面高程 E_C 之差:

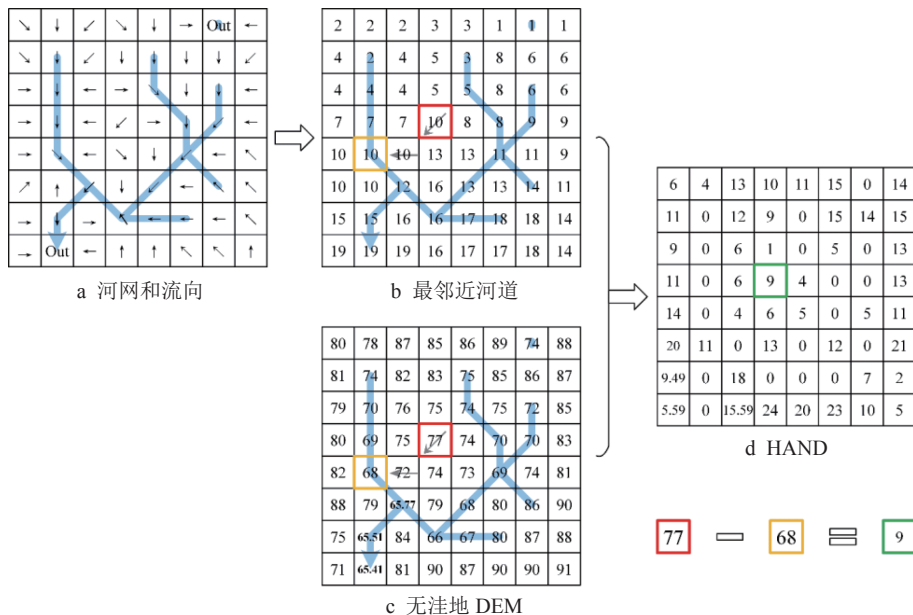


图 2 HAND 计算过程示意

$$D_C = Z_{ND} - E_C, \quad (4)$$

将式(3)代入式(4),再结合式(1),可得到淹没水深与 HAND 的联系为

$$D_C = E_{ND} + D_{ND} - E_C = D_{ND} - H_C. \quad (5)$$

上述分析表明,在洪水过程中,当河道水位从枯水期持续上涨时,洪泛平原上所有 HAND 小于河道水位上涨高度的区域将被淹没,其淹没水深为河道水位相较于枯水期的上涨高度与 HAND 之差.由此,可根据洪泛平原内 HAND 分布来推算河道水位上涨不同高度时对应的洪水淹没水深分布及淹没范围.注意到本研究所采用的 SRTM DEM 数据采集时期为 2000 年 2 月中旬,我国多数河流处于枯水期.

2 中国最近邻河道相对高度 (HAND) 数据集

基于 HAND 的定义与计算方法生成了 1000 和 250 m 这 2 种水平分辨率的中国 HAND 数据集,本文主要展示 250 m 分辨率的结果.首先以毛坦河小流域为例细致展示 HAND 的空间分布,然后展示中国 HAND 的空间分布.通过与相应区域的 DEM 对比,揭示 HAND 与经典的 DEM 数据的联系与区别.下文在阐述基于 HAND 的洪水淹没制图的合理性时,基于数据的可用性,采用了 2020 年 7 月淮河流域的洪水案例,故此处不失一般性地采用淮河流域的毛坦河小流域为例作细致展示.

2.1 小流域最近邻河道相对高度 (HAND) DEM 突出以流域干流为中心的上下游地形趋势, HAND 则着重表达流域中以每条河道为中心的局地地形.从表征 DEM(图 3-a)和 HAND(图 3-b)的颜色分布情况,可直观地看出二者在地形描述上所强调重点的差异.毛坦河流域最高的海平面相对高度为 1 701 m,最低为 98 m,地势从西南向东北降低,从 DEM 分布图中可大致看出河道位置,存在明显上下游地势差异;而毛坦河流域最大的最近邻河道相对高度为 692 m,无整体地形趋势,河道中 HAND 值均为 0,可明显看出河谷及山坡的位置, HAND 以河道为中心向两侧山坡延伸增大. HAND 相当于把河网平铺在同一平面上,地形以河道为基准面起伏变化,更能突出流域的局部水文特征.

2.2 中国最近邻河道相对高度 (HAND) DEM 数据可清晰展示中国地形的整体趋势, HAND 数据则更突出我国局地地形特征.从空间分布地图来看:中国 DEM 分布图反映了中国整体地势呈现西高东低、三级阶梯状分布的特点(图 4-a);而中国 HAND 分布图

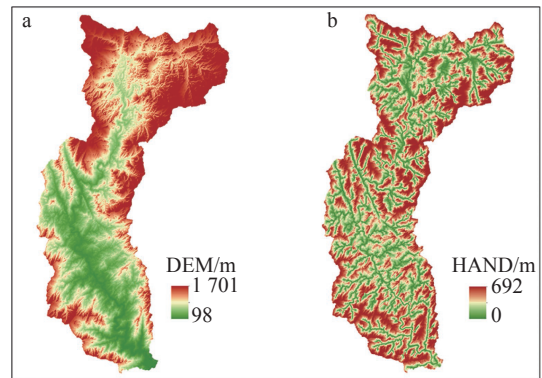


图3 毛坦河流域 DEM 与 HAND 对比
(12.5 m 水平分辨率)

则凸显了我国的平原、丘陵和山地等地貌形态的局地地形特征,比如新疆“三山两盆”、青藏高原内部起伏、四川盆地、东北平原、华北平原和长江中下游平原等(图 4-b).从 DEM 及 HAND 的统计分布图来看:我国 50% 国土的海拔低于 1 157 m, DEM 数值的频率分布存在 3 个明显的波峰,依次位于 0~200、900~1 200、4 800~5 100 m 区间(图 4-c),进一步体现了中国整体地势的三级阶梯起伏变化;我国 50% 国土与其最近邻河道的高差低于 25 m, 37% 低于 10 m(图 4-d 大图), HAND 数值的频率大致呈单峰的对数正态分布,在 [1, 3] m 区间上随着相对高度的增大而增大,在高于 3 m 后随着相对高度的增大而减小(图 4-d 内嵌小图).相较而言, HAND 比 DEM 更能表现局地地形的波动,前者将与最近邻河道具有一致相对高度的区域归为一类,而不管这些单元是否位于不同的海平面相对高度,一定程度上有利于对比研究海拔不同地区的液态水文过程.

3 中国河道型洪水淹没图库

依据中国 HAND 数据集以及淹没制图方法,构建了当河道水位相对于枯水期上涨 1~10 m 时中国河道型洪水淹没图库.首先以毛坦河小流域为例展示基于 HAND 数据绘制的河道型洪水淹没图细节,然后展示 250 m 水平分辨率的中国洪水淹没图.

3.1 小流域河道型洪水淹没图 图 5 显示了基于最近邻河道相对高度 (HAND) 计算的毛坦河流域的洪水淹没情况,该流域位于山区,山洪突发期间河道水位易暴涨暴落.图 5-a 展示了河道水位相对于枯水期上涨 10 m 时,整个流域的淹没水深分布情况,可见淹没区域位于河道邻近区域,需放大至河段才能看清具体淹没情况;图 5-b 放大展示了图 5-a 中矩形框区域当河道水位相对于枯水期上涨 1 m (深蓝色)、5 m (中度蓝色)和 10 m (浅蓝色)情景下对应的淹没范围并叠

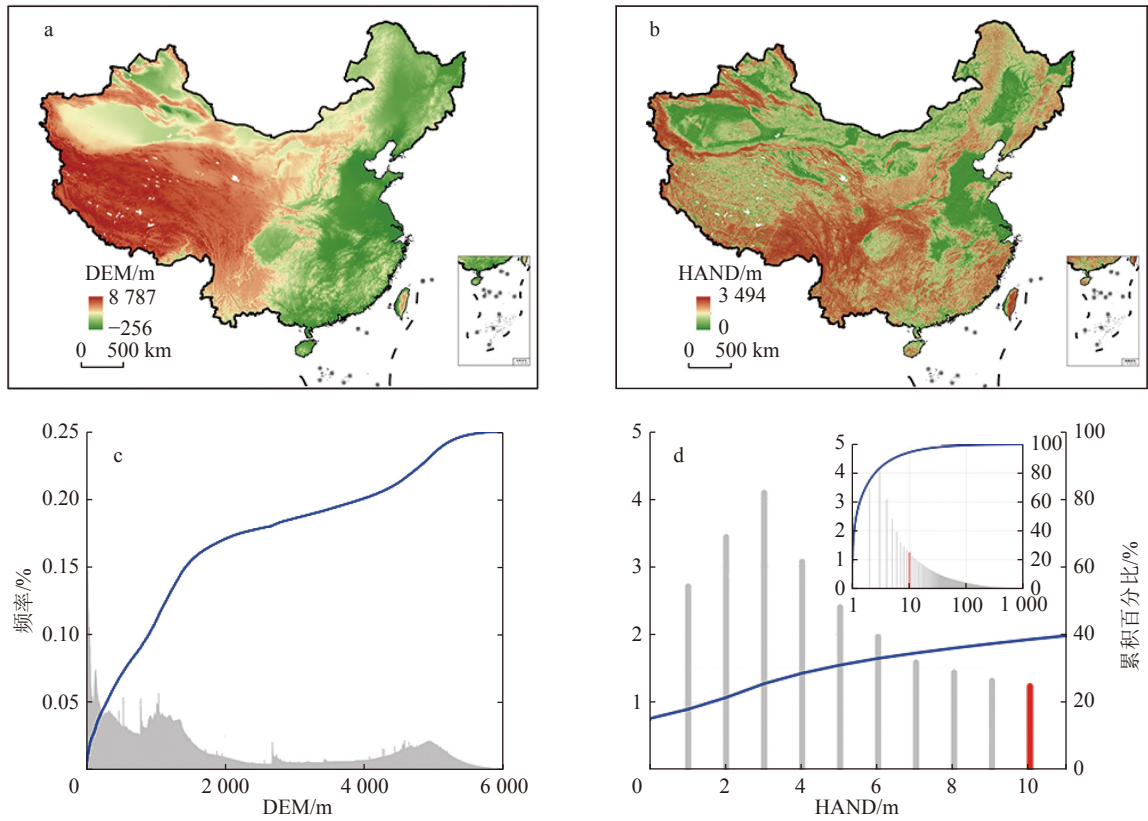


图 4 中国 DEM 与 HAND 对比 (250 m 水平分辨率)

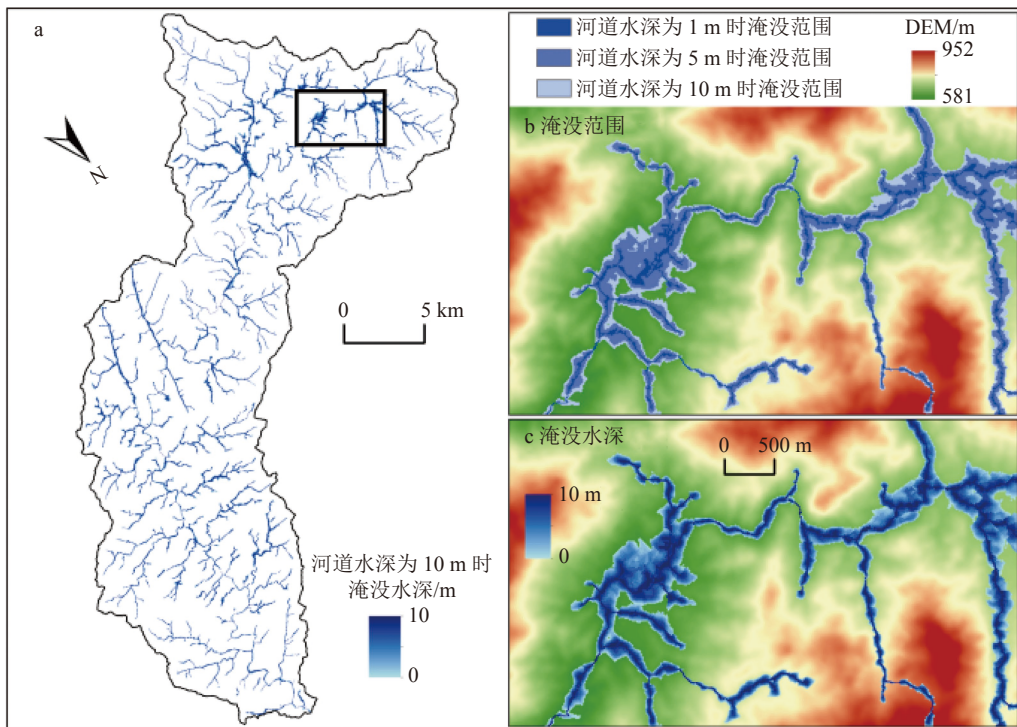


图 5 基于最近邻河道相对高度 (HAND) 计算的毛坦河流域洪水淹没情景 (12.5 m 水平分辨率)

加了相应的 DEM; 图 5-c 放大展示了图 5-a 中矩形框内的淹没水深并叠加了相应的 DEM. 上述 3 种水位上涨情景下, 毛坦河流域的淹没面积依次分别为 7、25 和 42 km², 分别占流域总面积的 1.3%、5.0% 和 8.6%.

3.2 中国河道型洪水淹没图库 基于最近邻河道相对高度(HAND)数据集及前述淹没制图方法, 绘制了河道水位相较枯水期上涨 1~10 m 情景下 250 m 水平分辨率的淹没图库. 在河道水位相较枯水期上涨 5 m

情景下,图 6-a 展示了中国 250 m 水平分辨率的淹没水深分布,图 6-b 展示了淮河流域 50 m 分辨率的淹没水深分布,图 6-c 为渭河流域 12.5 m 分辨率的淹没水深分布。

图 6-a 显示全国比较明显的洪泛区有东北平原、黄河下游及河口地区、淮河流域、长江下游及河口地区、鄱阳湖区、江汉平原及洞庭湖区和四川盆地西部等。由于地势平坦,塔里木盆地和部分内流河流域也对应着广大的淹没区,但这些区域有限的降水很难使水深达到 5 m(尽管如此,2021 年 8 月塔里木河支流二八台河发生大洪水)。

图 6-b 显示淮河流域整体易受淹没影响,流域内低洼易涝地区分布范围广、面积大;易涝地区包括沿淮湖泊洼地区域、淮北平原中部河间平原区、北部黄泛平原区、淮河南部支流圩区以及下游苏北平原。

图 6-c 显示淮河流域内含的渭河流域地势西南高、东北低,流域南部上游位于大别山区,地势陡峭,汇流集中,洪水涨落速度快,受淹没影响较小,易涝地区主要分布在流域中下游。由于洪水淹没是小尺度现象,在大尺度范围展示时淹没情况的区分度较差,图 6-c 放大了渭河流域中毛坦河局部河段,以利于辨识具体淹没情况。

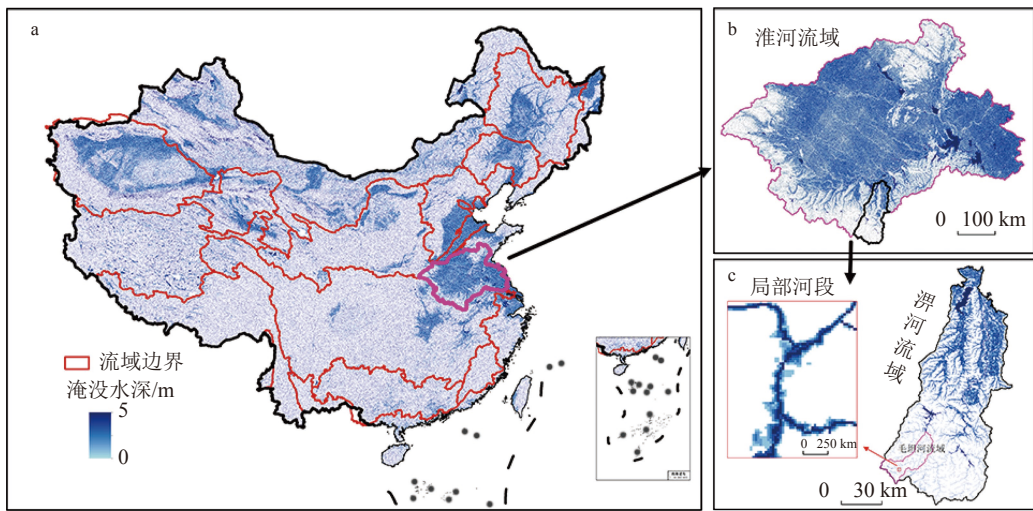


图 6 基于最近邻河道相对高度 (HAND) 计算的中国、淮河流域及渭河流域河道水位相较枯水期上涨 5 m 情景下的洪水淹没情况

对图 6 作以下说明:传统的洪水危险性图是对给定的流域或区域,假设范围内各河流同时发生某一频率(如 100 年一遇)的洪水,基于 GIS 技术、水文或水力学方法进行模拟,计算其淹没水深等的分布制作的。实际上,对于面积较大的流域或区域,极小可能出现各河流同时发生同一频率的洪水的情形。类相比于传统的洪水危险性图制作方法,本研究在基于 HAND 绘制中国洪水淹没水深分布图时,将各河流同时发生同频率洪水的情景更替为各河流同时上涨相同水位的情景。

随河道水位相较枯水期不断上涨,中国洪水淹没面积占国土面积比例不断增加,且增速先大后小(图 7)。河道水位相较枯水期上涨 1 与 10 m 时,相应的淹没面积占比约增加 10 倍。当河道水位相较枯水期上涨 <3 m 时,增长速度较快,当上涨 >3 m 时,增长速度减缓。当河道水位相较枯水期上涨 1、5 和 10 m 时,中国洪水淹没面积分别为 18 万、125 万和 197 万 km²。根据中国水旱灾害公报数据统计,洪水受灾面积占国土

面积比例的多年均值为 12.95%,大致相当于本研究中河道水位相较枯水期上涨 5 m 时的淹没面积占比。

3.3 基于最近邻河道相对高度 (HAND) 的淹没制图的验证 与采用遥感影像提取及 HEC-RAS 模拟的淹没范围的对比表明,基于 HAND 进行淹没范围评估及淹没制图具有可行性。2020 年 7 月淮河流域发

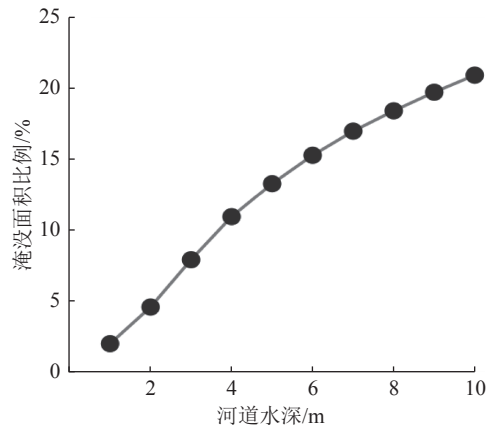


图 7 河道水深与中国淹没面积比例关系

生了较大的洪水, 淮南支流淠河受特大暴雨影响发生超保证水位洪水, 淠河横排头站洪峰流量 $4\,590\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 洪峰水位 55.47 m , 在 7 月 19 日 15:00 横排头水位 55.42 m , 相较于枯水期水位 (48.96 m) 上升 6.46 m , 这场事件为验证 HAND 应用于淹没制图的可行性提供了机会. 图 8 中红色矢量面显示了基于 7 月 20 日的 SAR 遥感影像提取的淠河洪水淹没范围, 黄色矢量面表示 HEC-RAS 依据洪峰流量模拟的淹没范围, 蓝色栅格数据为当水位上涨 6 m 时基于 HAND 计算的淹没分布.

图 8 表明 3 种方法给出的淹没范围有较好的一致性: 1) 在淠河主河道(即图 8-b 中最长的河道)附近, 遥感提取的水体面积约为 29.4 km^2 , HEC-RAS 计算的淹没面积约为 24.5 km^2 , 基于 HAND 计算的淹没面积约为 25.1 km^2 , 三者差异较小, 图 8-b 中淠河干流南段和中段 3 种方法评估的淹没范围也比较接近; 2) 图 8-a、c 局部放大图显示 3 种方法给出的淹没边界基本吻

合. 显然, 图 8 中还存在部分区域 3 种方法给出的洪水淹没范围不完全重合: 在河道以外的洪泛平原上基于 HAND 计算的淹没面积大于遥感提取的水体面积, 这与洪水过境是动态变化的过程而遥感影像获取是瞬时情景、很可能低估实际淹没范围有关^[33]; 基于 HAND 模拟的淹没范围与 HEC-RAS 结果整体一致, 但从模拟的效率上来看, HEC-RAS 建模耗费大量人工, 需要描绘河道河岸、采集多个断面数据、调试曼宁系数等参数, 模拟计算过程更复杂. 相较而言, 基于 HAND 的淹没制图方法充分依据地形与水流路径确定淹没范围, 能够自上游到下游体现洪水演进时的最大淹没范围, 计算简单高效, 原理便捷易懂, 且具有物理基础, 适用于任何有地形数据的地方. 未来的研究中, 可以进一步选取洪峰不同过境时刻的遥感影像, 以及获取更详细的断面与水文信息进行水文建模, 以验证基于 HAND 淹没制图的精确性.

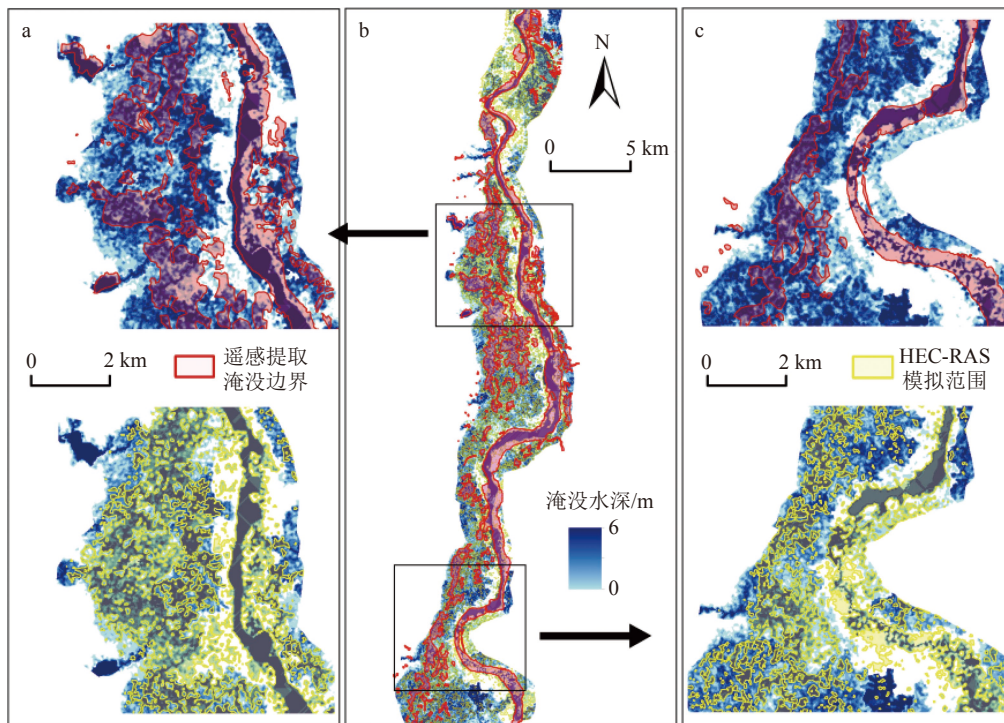


图 8 基于最近邻河道相对高度 (HAND)、遥感反演及 HEC-RAS 估算的淹没范围

4 结论与讨论

根据 Rennó 等^[5] 和 Nobre 等^[6] 提出的 HAND 地形模型, 本研究生产了 $1\,000\text{ m}$ 和 250 m 水平分辨率的中国 HAND 数据集, 并将其应用于快速绘制大范围的高分辨率洪水淹没图, 建立了河道水位相较枯水期上涨 $1\sim 10\text{ m}$ 时的中国河道型洪水淹没图库. 研究表明:

1) 相较于经典的 DEM 数据, 由其衍生的 HAND 数据能够补充提供局地地形信息. 本文第 2 章对比了

毛坦河小流域和中国的 DEM 与 HAND, 前一对比表明 DEM 呈现了以干流为中心的上下游地形趋势, HAND 则凸显了以各条河流为中心的局地地形特征, 而后一对比中 DEM 展现了中国三级阶梯整体地势特征, HAND 则突出了山地、丘陵、平原等主要地貌形态. DEM 以海平面为统一基准面, 主要表征了整体地形趋势, 但整体区域较大的海拔高差掩盖了 DEM 对局地地形信息的表达. 相较而言, HAND 以局地河网为

基准,强调了坡地与最近邻河道的高差,剔除了河道坡降,有利于凸显局地地形和更深入地揭示地形与水文响应及相伴的地理和生态等过程的联系。

正是如此,除应用于水文领域以外,HAND还在多个相关领域有较广泛的应用前景:在生态学领域,HAND被用作表征森林物种分布、土壤呼吸模式的重要环境变量^[34-37];在自然灾害领域,一方面采用HAND对洪水淹没制图的可靠性在河段、流域、城市及国家等尺度上得到了验证^[38-42],另一方面HAND因能同时反映汇流路径及土壤水分状况而被用于滑坡易感性评估^[43-44]。Zhu等^[45]将“地理环境越相似,地理特征越相近”的地理现象命名为地理学第三定律——地理相似性规律,HAND将地形与水文响应紧密联系在一起,HAND相同的地表单元表现出相似的水文特征。水文过程又与众多的生态、环境等过程息息相关,因此,HAND在水文气象学、生态学和地理学等领域的本土化应用前景值得期待^[5-6]。本文生成的中国HAND数据集为上述潜在应用提供了数据基础。

2)基于HAND进行快速、大范围和高水平分辨率的淹没范围评估及淹没制图具有可行性和合理性,本文第3章基于HAND绘制了中国1000和250m分辨率的洪水淹没水深分布,并将划定的淹没区与我国多年洪水灾害严重的区域,以及2020年7月淮河支流淝河的洪水淹没遥感监测与HEC-RAS模拟结果进行了比较,均具有较好的一致性。基于一维、二维和三维水动力学模拟方法的淹没制图具有更高的精确性,然而模拟需要的输入数据、计算资源或建模人工投入要求较高,使其大范围推广应用一定程度上受阻。基于HAND的淹没制图方法:1)本质上属于水文学方法,因其考虑了汇流路径方向上的水势梯度而具有一定的物理基础,且与基准二维水动力模拟的淹没制图原理高度相似;2)相较于水动力学方法,所需的计算量显著减小,因而运行效率高,可支撑大范围、高水平分辨率的快速计算;3)所需的输入数据为相对容易获取的地形数据,均以河道水位相较于枯水期的上涨高度来描述洪水的强度,既保障了不同区域淹没情景的可对比性,也使得同一区域不同时期的洪水淹没情景具有可比性。

然而,基于HAND进行淹没制图存在以下值得注意的问题:1)与基于水文水动力学模拟方法一样,需关注地形数据的水平分辨率和垂直精度,以及河网密度对淹没制图精度的影响^[46-48]。在数据和计算资源允许的条件下,应采用高分辨率、高精度的地形数据计算最近邻河道相对高度及进一步制作淹没图。我们目前正在逐步推进计算全国100、30m分辨率的最近

邻河道相对高度数据及相应的淹没图库。2)与常用的年遇洪水风险图类似,作为一种基于情景的静态淹没制图方法,它能服务于洪水防范规划和最大可能洪水影响评估,不能展现洪水演进过程中的动态淹没变化,但可通过耦合降水径流模拟提供动态淹没过程。尽管如此,基于HAND的淹没制图可以应用于任何有数字高程数据的地方,这为大范围洪水淹没制图提供了参考。

鉴于地形数据的水平分辨率与垂直精度对地形特征的刻画及洪水淹没制图有一定影响,在未来的研究中,我们将进一步采用更好的地形数据升级中国HAND数据集与淹没图库,提高淹没制图的精度,推进HAND地形数据在地理学相关领域的应用。

5 参考文献

- [1] 李振洪,李鹏,丁咚,等.全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1927
- [2] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1305
- [3] 宋晓猛,张建云,占车生,等.基于DEM的数字流域特征提取研究进展[J].地理科学进展,2013,32(1):31
- [4] 熊礼阳,汤国安,杨昕,等.面向地貌学本源的数字地形分析研究进展与展望[J].地理学报,2021,76(3):595
- [5] RENNÓ C D, NOBRE A D, CUARTAS L A, et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3469
- [6] NOBRE A D, CUARTAS L A, HODNETT M, et al. Height above the nearest drainage: a hydrologically relevant new terrain model[J]. Journal of Hydrology, 2011, 404(1/2): 13
- [7] CONDON L E, MAXWELL R M. Evaluating the relationship between topography and groundwater using outputs from a continental-scale integrated hydrology model[J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6602
- [8] FAN Y. Groundwater in the Earth's critical zone: relevance to large-scale patterns and processes[J]. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3052
- [9] HAMDANI N, BAALI A. Height above nearest drainage (HAND) model coupled with lineament mapping for delineating groundwater potential areas (GPA) [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 9: 100256
- [10] GAO H K, BIRKEL C, HRACHOWITZ M, et al. A simple topography-driven and calibration-free runoff generation module[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(2): 787
- [11] MIGUEZ-MACHO G, FAN Y, DOMINGUEZ F.

- Advances in groundwater representation at the subgrid scale in land surface models: an approach based on HAND (heightabovenearestdrainage)[C]. SanFrancisco:AGUFallMeeting Abstracts, 2020, 2020: H201
- [12] GHARARI S, HRACHOWITZ M, FENICIA F, et al. Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a Central European meso-scale catchment[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(11): 3275
- [13] NOBRE A D. Interactive comment on “Land classification based on hydrological landscape units” by S. Gharari et al[J]. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2011, 8: C2446
- [14] CUARTAS L A, TOMASELLA J, NOBRE A D, et al. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 462/463: 15
- [15] CLARK M P, NIJSSEN B, LUNDQUIST J D, et al. A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2498
- [16] FENICIA F, KAVETSKI D, SAVENIJE H H G, et al. From spatially variable streamflow to distributed hydrological models: analysis of key modeling decisions[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(2): 954
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水文基本术语和符号标准: GB/T 50095—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015
- [18] JHA A K, BLOCH R, LAMOND J. Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st Century[M]. [S. l.]: The World Bank, 2012: 638.
- [19] FEMA. Managing floodplain development in approximate zone A areas: a guide for obtaining and developing base (100-year) flood elevations[S]. Hyattsville, MD: FEMA 265. 1995: 151
- [20] TENG J, VAZE J, DUTTA D, et al. Rapid inundation modelling in large floodplains using LiDAR DEM[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(8): 2619
- [21] 张志彤. 实施洪水风险管理是防洪的关键[J]. *中国防汛抗旱*, 2019, 29(2): 1
- [22] APEL H, ARONICA G T, KREIBICH H, et al. Flood risk analyses: how detailed do we need to Be?[J]. *Natural Hazards*, 2009, 49(1): 79
- [23] MAIDMENT D R. Conceptual framework for the national flood interoperability experiment[J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2017, 53(2): 245
- [24] 向立云. 洪水风险图编制与应用概述[J]. *中国水利*, 2017(5): 9
- [25] 徐美, 雷莹. 全国重点地区洪水风险图成果保密技术处理[J]. *中国防汛抗旱*, 2018, 28(7): 8
- [26] 章杭惠, 伍永年, 刘曙光. 太湖流域洪水风险图编制与推广应用[J]. *中国水利*, 2017(5): 27
- [27] 田以堂, 杨卫忠, 许静. 我国洪水风险图编制概况及推进洪水风险图应用的思考[J]. *中国防汛抗旱*, 2015, 25(5): 17
- [28] 杨爱玲, 朱岩隆, 周泉, 等. 洪水风险图编制技术研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(4): 197
- [29] 赵刚, 徐宗学, 庞博, 等. 基于改进填洼模型的城市洪水灾害计算方法[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 20
- [30] 赵玲玲, 刘昌明, 吴潇潇, 等. 水文循环模拟中下垫面参数化方法综述[J]. *地理学报*, 2016, 71(7): 1091
- [31] 黄平, 张行南, 徐涛, 等. 常用免费DEM数据质量分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(2): 75
- [32] 马春英. 中国河道型洪水高分辨率淹没制图及暴露估算研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2019
- [33] CHEN B, KRAJEWSKI W F, GOSKA R, et al. Using LiDAR surveys to document floods: a case study of the 2008 Iowa flood[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 338
- [34] SCHIETTI J, EMILIO T, RENNÓ C D, et al. Vertical distance from drainage drives floristic composition changes in an Amazonian rainforest[J]. *Plant Ecology & Diversity*, 2014, 7(1/2): 241
- [35] de MELO FIGUEIREDO S M, VENTICINQUE E M, FIGUEIREDO E O. Spatial scale effects of sampling on the interpolation of species distribution models in the southwestern Amazon[J]. *Revista Árvore*, 2016, 40(4): 617
- [36] SALESKA S, DA ROCHA H, KRUIJT B, et al. Ecosystem carbon fluxes and Amazonian forest metabolism[M]// Amazonia and Global Change. Washington, D. C. : American Geophysical Union, 2009: 389
- [37] CIRINO G G, SOUZA R A F, ADAMS D K, et al. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(13): 6523
- [38] SPECKHANN G A, BORGES-CHAFFE P L, FABRIS-GOERL R, et al. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, 63(1): 87
- [39] MOMO M, PINHEIRO A, SEVERO D, et al. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de Alta resolução espacial[J]. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2016, 21(1): 200
- [40] LIU Y Y, MAIDMENT D R, TARBOTON D G, et al. A CyberGIS integration and computation framework for high-resolution continental-scale flood inundation mapping[J].

- JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2018, 54(4): 770
- [41] GAROUSI-NEJAD I, TARBOTON D G, ABOUTALEBI M, et al. Terrain analysis enhancements to the height above nearest drainage flood inundation mapping method[J]. Water Resources Research, 2019, 55(10): 7983
- [42] CHAUDHURI C, GRAY A, ROBERTSON C. InundatEd-v1.0: a height above nearest drainage (HAND)-based flood risk modeling system using a discrete global grid system[J]. Geoscientific Model Development, 2021, 14(6): 3295
- [43] KORNEJADY A, OWNEGH M, RAHMATI O, et al. Landslide susceptibility assessment using three bivariate models considering the new topo-hydrological factor: HAND[J]. Geocarto International, 2018, 33(11): 1155
- [44] BARELLA C F, SOBREIRA F G, ZÉZERE J L. A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3205
- [45] ZHU A X, LU G N, LIU J, et al. Spatial prediction based on Third Law of Geography[J]. Annals of GIS, 2018, 24(4): 225
- [46] 刘仁义, 刘南. 基于GIS的复杂地形洪水淹没区计算方法[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 1
- [47] 刘凡, 陈波, 史培军. DEM水平分辨率越高提取的河长越准确? [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 610
- [48] 刘天雪, 王瑛, 陈笑娟, 等. DEM分辨率对山洪淹没模拟影响[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 156

Height above nearest drainage and application in flood inundation mapping in China

LIN Tingting¹⁾ SHI Peijun^{1, 2)} MA Chunying¹⁾ SHI Fanya¹⁾
NIE Juan³⁾ CHEN Bo¹⁾

(1)Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters, Ministry of Education, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China; 2)Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, 810016, Xining, Qinghai, China; 3)National Disaster Reduction Center of China, 100875, Beijing, China)

Abstract Local topography, a major governing factor of surface water movement, plays important roles in hydrological responses and associated geographical and ecological processes. But data sets highlighting local topographic characteristics covering contiguous China are lacking, let alone its wide applications. The height-above-nearest-drainage (HAND) concept, which derived from classical digital elevation model (DEM), was used to produce HAND data set for China with grid sizes of 250 and 1 000 m by SRTM DEM, then HAND data were applied for inundation mapping. Library of inundation maps for scenarios of water level rise of 1–10 m from low-flow condition along rivers and streams were developed. Such maps cover contiguous China with horizontal resolutions of 250 and 1 000 m. The great flood with peak discharge in July of 2020 along Pi River tributary of Huai He River was studied. The inundated areas retrieved from SAR images on July 20th of 2020 and simulated by HEC-RAS were compared with HAND-based inundation maps. Complementary to DEM with overall features of topography, HAND was found to signify local topographic characteristics over large regions. HAND could therefore be used as a simple but feasible and reliable approach, to map flooded areas. HAND data set of China produced in this work highlights localized topography for geography-related research. HAND-based inundation maps may shed light into flood risk management in China.

Keywords height above nearest drainage; inundation mapping; local topography; flood; hydrology; DEM

【责任编辑:刘先勤】