

DOI: 10.20103/j.stxb.202401230205

王天巍, 李念. 泥沙连通性定量表征指数研究进展及发展需求. 生态学报, 2024, 44(24): 11497-11511.

Wang T W, Li N. Research progress and development demands of the quantitative index for sediment connectivity. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11497-11511.

泥沙连通性定量表征指数研究进展及发展需求

王天巍*, 李 念

华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要: 泥沙连通性在土壤侵蚀和沉积研究中受到越来越多的关注。表征指数是连通性评估从定性向定量转移的关键手段。相较于景观连通性和水文连通性, 泥沙连通性研究以及定量表征指数的开发尚处于起步上升阶段, 因此有必要对其进行系统总结以发现其中的挑战和机遇。研究基于知识图谱的视角梳理和分析了国内外泥沙连通性研究进展及关注热点, 并建立了一个概念框架来系统阐明泥沙连通性概念组成和影响因素。通过对现有泥沙连通性定量表征指数的审查来总结和讨论目前存在的局限和亟待突破的研究屏障。研究从泥沙连通性研究的需求背景出发, 系统整理其概念框架, 基于当下困境讨论未来的发展需求, 并强调了在这一领域进一步工作的必要性。

关键词: 土壤侵蚀; 泥沙连通性; 概念框架; 结构连通性; 功能连通性

Research progress and development demands of the quantitative index for sediment connectivity

WANG Tianwei*, LI Nian

College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: Sediment connectivity has received increasing attention within the realm of soil erosion and sedimentation research. Characterization indices serve as pivotal tools for transitioning the assessment of connectivity from qualitative to quantitative. Compared to landscape connectivity and hydrological connectivity, research on sediment connectivity and the development of quantitative characterization indices are still in their early stages, highlighting the importance of systematically summarizing these advancements to uncover the challenges and opportunities. This paper comprehensively summarized and analyzed the advancements and trending themes in domestic and international research on sediment connectivity based on the perspective of a knowledge graph, and established a conceptual framework to thoroughly elucidate the components and influencing factors of sediment connectivity. Finally, the existing quantitative characterization indices for sediment connectivity were reviewed to summarize and discuss the current limitations and research barriers that urgently needed to be overcome. Commencing from the background of the research demand for sediment connectivity, the paper systematically organizes its conceptual framework, then discusses future development needs based on the current predicament, and emphasizes the necessity of further work in this field.

Key Words: soil erosion; sediment connectivity; conceptual framework; structural connectivity; functional connectivity

土壤侵蚀是造成全球土地退化的重要因素, 威胁自然资源 and 环境的可持续性。流域出口处的输沙量监测

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2240222); 水利部重大科技项目(SKS-2022091)

收稿日期: 2024-01-23; 网络出版日期: 2024-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangtianwei@webmail.hzau.edu.cn

表 1 泥沙连通性相关研究关键词突现统计表

Table 1 Results for the keywords with "sediment connectivity" detection using CiteSpace

关键词 Keywords	突现强度 Strength	开始年份 Begin year	结束年份 End year	年份跨度:1991—2022 Temporal interval: 1991—2022
潜流带 Hyporheic zone	7.75	1997	2013	
扰动 Disturbance	8.08	2004	2013	
尺度效应 Scale effects	9.38	2012	2018	
水文连通性 Hydrological connectivity	3.51	2014	2019	
模型 Models	7.84	2015	2018	
景观连通性 Landscape connectivity	10.87	2016	2018	
泥沙连通性 Sediment connectivity	40.7	2017	2022	
地理信息科学 Geographic information science	7.91	2017	2018	
气候变化 Climate change	11.32	2018	2022	
框架 Framework	10.81	2018	2022	
蓄积 Storage	8.84	2018	2019	
运载 Load	8.35	2018	2019	
泥石流 Debris flood	11.92	2019	2020	
大坝 Dam	9.03	2020	2022	

加粗线段表示关键词突现阶段

第一阶段为 1991—2000 年,该阶段关于泥沙连通性的年均发文量不超过 10 篇,且未展现出显著增长趋势,但领域内未来的发展分支均在此期间萌芽。其中,河流的泥沙运移问题最先被关注,并逐步分析泥沙运移导致的物质流动(如氮、磷等)以及气候、植被等因素对泥沙运移的影响,但是概念体系并不完善,且研究深度受到局限。第二阶段为 2001—2012 年,该时期领域的研究动态较为活跃,整体呈现上升趋势且发展速度较快,并建立了较为全面的连通性概念体系^[1]。从连通内涵角度将结构连通定义为生境斑块之间的物理联系,功能连通定义为生物在景观中的流动。从运作过程方面将坡面向沟道或河道向洪泛平原方向的运移定义为横向,将水系上游向下游或支流向干流的运移定义为纵向,将表层向表下层的运移定义为垂向^[2-3]。该概念体系也支撑着泥沙连通性研究并推动其发展。泥沙连通性被形容为“泥沙从一个区域或位置转移到另一个区域或位置,以及特定颗粒在系统中移动的潜力”^[4]。学者们从连通性的解释变量为切入点,关注变量本身(例如降雨、地形、土壤、植被以及人为活动等)或变量的空间分布及变异特征对不同尺度(地块/坡面尺度、河道运移尺度、流域尺度等)、不同类型(横向、纵向、垂向等)连通性的影响。第三阶段为 2012 年至今,泥沙连通性研究数量呈现爆发式增长,年文章数量从不足 100 篇增长至超过 350 篇。从关注目标上来说,目前注意力更多地被集中在泥沙连通性表征模型^[5-7]、连通性的尺度效应^[8-9],自然和人为影响下的连通性变化^[10-12],以及结构连通和功能连通之间的联系和发展^[13-14]。

泥沙连通性概念一直隐含在诸如“泥沙输移比”等经验方法中,但这些方法传统上一直是“黑匣子”,对泥沙从源区到汇/出口的空间和时间模式少有了解。此外,早期研究主要以定性的方式处理连通性,例如结合实地调查,从地貌图或航空照片中提取和解释(不)连通信息。而泥沙连通性指数作为一种综合衡量标准,是使连通性评估从定性到(半)定量的关键手段。由于在大多数情况下,泥沙的输送难以直接测量,地貌过程引起的泥沙输移行为更是难以捕捉或预测。此时,泥沙连通性指数可以通过一些可测变量来表征复杂的水文和地貌过程。在定量表征泥沙输送和预测流域产沙的强烈需求下,泥沙连通性指数得到发展^[15],也使得不同尺度、考虑不同解释变量和不同地貌过程的表征模型研究成为第三阶段(当前)的研究热点。虽然表征模型取得了长足的进展,但也暴露出一些问题,例如模型中泥沙连通性概念的物理含义还缺乏明确表达,如何将其与实际地貌行为联系起来仍待解决,结构连通对功能连通的影响或联系不明确,尺度间的转化关系还需完善,这些都限制了表征指数的发展和应用^[16-17]。因此,本文建立了一个概念框架来系统阐明泥沙连通性的概念组

成和影响因素,综述现有泥沙连通性定量表征指数成果,并基于提出的概念框架对这些指数进行对比分析以系统总结当前进展,进而讨论目前存在的局限和亟待突破的研究屏障,旨在促进对泥沙在地貌系统中的传输行为的理解,这对于水土资源保护和河流管理具有重要的实践意义。

1 泥沙连通性概念及框架

结构连通性和功能连通性是泥沙连通性概念框架中的重要组成,结构连通性取决于地貌基本单元的空间布局和属性,功能连通性通过沉积物的实际转移建立,二者之间存在相互影响或相互包容的关系,因此建立了一个由内圆(结构连通)、中环(功能连通)和外环(尺度效应)嵌套而成的泥沙连通性概念框架(图2)。

1.1 地貌系统内在特性——决定结构连通

基本单元是建立连通的底层基础。基本单元相对于潜在径流路径和流域出口的相邻地貌和相对位置决定了结构连通性,其类型包括地貌图描绘的地貌实体或类型,基于地形或水文特征划分的地块,例如坡度单元以及水文响应单元等。结构特性和功能特性是结构连通性的控制要素。其中结构特性包括流域形态(面积、形状、沟壑密度等)、地形特征(坡度、坡向、坡型、高程、粗糙度等)、地质地貌(地质构造、基岩特性、地貌特征等)等固有特征。地表功能特性由土壤特性(水力传导率、水分存储、抗蚀性等)、地表覆盖物(植被、凋落物、结皮等)、微地形(洼地)等决定。具有不同结构和功能特征的基本单元的空间分布(即位置、大小和汇流路径的拓扑序列)决定了结构连通性。

1.2 环境背景与地貌的相互作用过程——实现功能连通

基本单元间的结构连通并不意味着沉积物实际产生了单元间的流动,实际的转移是否产生取决于外部驱动下环境背景与地貌系统之间的相互作用。外部驱动因素主要包括气候和人为活动。最关键的气候因素为降雨,降雨强度、频率、持续时间等特征直接控制了径流产生并克服流动过程中的损耗最终达到出口,以实现流域的连通的潜力。温度通过控制冻融和蒸散来调控径流的输入或损失。人为活动的驱动主要体现在人工排水方面,通过修建排水沟渠和布设管道直接改变了连通路程和连通效率。环境背景和地貌相互作用过程描述了径流、泥沙运动等现象发生的空间分布和时间发展,这些过程将水和泥沙通过径流和泥沙路径转移至出口,导致了功能连通的出现。此外,水文过程中产流方式、径流组分、泥沙运动形式等的差异会导致连通的建立方式和速度的不同。结合水动力学和沉积动力学可以更好地理解泥沙在地貌系统的输运和沉积规律,从而揭示泥沙功能连通的形成机制和影响因素。

1.3 泥沙连通性的尺度效应

从空间尺度上来说,尺度效应体现在泥沙连通建立的各个方面。目前绝大多数研究涉及三个尺度级别,即地块/坡面、河道以及流域尺度。在内在特性方面,不同尺度连通性的响应变量存在差异。对地块或坡面尺度来说,地形是建立连通的主导因素,坡度和表面斜率决定了流速、径流的发散和收敛,微地形决定了洼地的存储能力,因此控制了地块/坡面连通的速度;对河流河段尺度来说,河网密度、河床特征在控制河道水力学中起到关键作用,并影响连通的建立;对流域尺度来说,影响地块和河网的因素都适用,但此时流域内地块及河网的空间分布特征会影响连通的响应。从连通性指数的适用范围来说,地块/坡面尺度或简单河段的连通性通常可被表示为一个单一的集总变量,而一个大区域的连通性则需要空间分布式指数进行描述。这是因为在小尺度向大尺度的转换过程中,径流和侵蚀的响应会减弱,同时会涉及新增的地貌过程,导致大区域的连通性

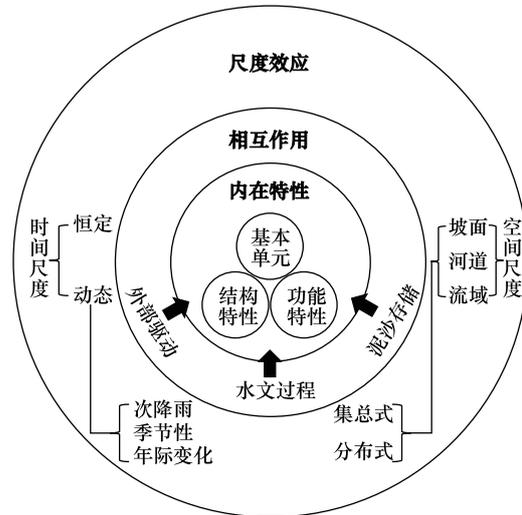


图2 泥沙连通性概念框架

Fig.2 Conceptual framework for sediment connectivity

不能由其单个组成部分的简单总和产生^[18-19]。

从时间尺度上来看,地貌过程和外力驱动在不同的时间尺度存在差异。首先从地貌过程来看,在次降雨的时间尺度上来说,随着径流量下降,挟沙能力减弱,泥沙在运移过程逐渐沉积,因此连通性一般不高,但是在足够长的时间尺度上来说,连通可以是 100%的^[20]。从外力驱动来看,强度、频率等一般不是恒定的,比如次降雨的降雨过程中,连通性应该是具有时间变异性的。因此,一些动态的连通性指数通过纳入具有时间依赖性的参数来反映泥沙运移能力在次降雨、季节性或年际间的变异性。然而,对于一些描述结构连通性的指数来说,很难界定一个时间尺度,使得地貌系统内部结构性质发生重大变化,因此,他们大多属于时间上恒定的静态指数。

2 泥沙连通性定量表征研究进展

2.1 泥沙连通性定量表征指数

2.1.1 间接表征

在泥沙输移问题中,一些概念虽然没有通过可测量的解释变量来表征不可直接衡量的连通性,但它们蕴含了泥沙传递过程的内涵,与泥沙连通性密切相关。

(1) 泥沙输移比(Sediment delivery ratio, SDR)

流域尺度的泥沙收支通过泥沙输送比来量化泥沙输送的效率^[21]。泥沙输移比起初被提出用于估计入海泥沙数量,随后在不同应用场景中通过给予必要的限制条件衍生出了不同的定义^[22-24]。曾伯庆^[25]在土壤侵蚀学使用场景中提出将流域出口处监测的泥沙量作为输沙量,流域内各个地类侵蚀总量为流域内产沙量,泥沙输移比表示为输沙量与产沙量之比,公式如下:

$$SDR = \frac{Y}{\sum_{i=1}^n a_i S_i}$$

式中, Y 表示流域出口实测泥沙量(t/km^2 或 t); S_i 表示各地类的侵蚀模数(t/km^2 或 t); a_i 表示各地类面积占流域总面积的比值。流域泥沙输移比是连接流域内地表侵蚀和流域外河道输沙的纽带,是研究流域内泥沙滞留潜力和水土保持效益的重要指标。同时也是表征泥沙从侵蚀源地向流域出口转移能力的指标,因此可被当作泥沙连通性表征指数。如果能够实现泥沙输移比的准确预测,就可为预报下游输沙量,制定流域水沙管理策略提供科学依据。

泥沙输移比的计算方法可分为直接计算和模型模拟两种。其中,直接计算需要确定出口处的输沙量和流域内的侵蚀量。由于输沙量是水文测站的基本监测内容,因此泥沙连通性计算的关键在于侵蚀量的确定。土壤侵蚀量可通过径流小区或单元小流域的实地监测资料^[26]、元素示踪技术^[27-28]以及土壤侵蚀模型模拟^[27]来获取。模型模拟法又可被细分成以下 2 种方法:①经验公式法,在已知泥沙输移比的情况下,通过建立变量因子(例如,流域面积、径流量、植被、泥沙粒径等单因素变量或多因素综合变量)与泥沙输移比之间的经验方程来建立预测模型^[21, 30-31]。②物理模型法,在土壤侵蚀机制研究的基础上,分析泥沙输移过程中的主导因素,从雨滴溅蚀、径流侵蚀、对推移质和悬移质的携带等物理机制出发推导泥沙输移比公式^[32-33]。

流域泥沙输移比是包括地质地形(例如,岩性、坡长、坡度、曲率、坡型、起伏度)、土壤功能特性(例如,水力传导度、可蚀性)、土地覆被在内的地貌内在特征,和各种水文气象的外部驱动交互影响、综合作用的结果。由于其本身具有空间概括性和可计算性,泥沙输移比也常被用来建立与新指数之间的关系以评价或验证该指数的计算结果。

(2) 有效集水区(Effective catchment area, ECA)

从泥沙输移比的概念可知,流域内并非所有的产沙区都能够与流域以外的河道网络相耦合。使用有效集水区处理流域侵蚀泥沙输送问题时,通过在空间上划定有效地帮助泥沙从各个源地输送到河道网络或出口的区域,进而识别潜在风险区的位置和范围,对其进行针对性防治。有效集水区是衡量有潜力为河道网络贡献

泥沙的集水区比例的指标,与泥沙连通程度直接相关。

多种形式的地貌特征和行为都会使流域内的某些区域与主要的泥沙输送路径断开连接,进而体现在有效集水区的变化。因此,有效集水区的界定通常是通过地貌、土地覆盖图以及地形数据推断断开连接的区域来实现的。Fryirs 等^[2]针对横向、纵向和垂向连通情景将断开连接的地貌形式分为缓冲区、障碍物和覆盖层,并通过高地形起伏流域和较平坦流域的比较探讨了这些特征在不同地貌环境中的作用差异。

由于坡度是沿着流向方向的水流功率和泥沙运移能量的主要决定因素,且具有相对恒定的时间变异性 and 易评估性,基于坡度阈值的 GIS 建模方法成为划定有效集水区的常用方法,其基本假设是“坡度控制了泥沙向流域外的输送”。该方法需基于数字高程模型 (DEM) 利用汇流算法提取在断开连接约束下能够与流域外河道建立连接的有效集水区。其中断开连接区域需通过创建坡度栅格和坡度阈值来确定,小于该坡度阈值的区域则认为无法完成泥沙运移。有效集水区划定结果对于不同的坡度阈值具有极高的敏感性,因此,坡度阈值的确定是该方法在应用过程中的关键所在,并由此出现了一些基于可变阈值的有效集水区提取研究^[34]。Fryirs 等^[35]在一个由高原、山地、起伏平原等多景观复合的流域中选取了 0.5° 、 2° 和 25° 作为坡度阈值,结果显示坡度阈值为 2° 时最能反映促进泥沙运移的能量条件。该团队在另一个支流众多的谷地中也得出了相同的适用阈值为 2° ,并提出可以根据研究区的河床和地貌特征对该阈值进行定制^[36]。而当该方法应用于中国黄土高原地区陡峭山地环境时,发现将 2° 作为坡度阈值将导致整个流域几乎完全连通,最终通过迭代试验出最能代表该特征地区流域连通的坡度阈值为 8° ,并且量化了有效集水区对坡度阈值的高度敏感,当阈值增加 1° 时,有效集水区面积相应减少 8%,当阈值减少 1° 时,有效集水区面积增加 9.4%^[37]。

有效集水区面积除了用作独立表征指数外,还可与集水面积进行比值运算以直观反映能够参与流域总体的泥沙级联的区域范围。与有效集水区具有相似内涵的概念,例如泥沙贡献区 (Sediment contributing area, SCA) 也可以被用于描述泥沙连通性。泥沙贡献区是指在不同地质、地貌过程作用下,泥沙产生和迁移的区域,有助于理解地貌过程之间的相互作用,对泥沙产量区域性估算具有重要意义,并能够帮助确定高通量的泥沙输送通道^[38-39]。

(3) 水流功率

水流功率描述了水流对外界做功时能量的消耗率。具体而言,水流功率反映了水流对地表的剥蚀和搬运能力,随着水流功率的增加,其挟沙力也会增强,与此同时径流在坡面和沟道中的输移时间会缩短,导致沿途的泥沙淤积减少,从而增强了泥沙连通性^[40]。因此,水流功率可以作为评估输沙阻抗和泥沙连通性的指标^[41]。水流功率通常表示为水体密度 ρ 、重力加速度 g 、流量 Q 和水力坡度 j 的函数: $\Omega = \rho g Q j$ ^[42]。由于流量 Q 通常被认为是上坡集水面积 A 的幂函数,水流功率指数 (Stream power index, SPI) 的一般公式常用上坡集水面积 A 和水力坡度 j 表达。

DEBAS (Stream power DEFicit on BASin slopes) 指数和 DENET (Stream power DEFicit on channel NETwork) 指数是基于简单水流功率指数 SPI 发展起来的,二者分别通过描述流域坡面上的水流动力损耗和河道中的水流动力损耗来反映局地侵蚀和出口处的产沙之间的联系程度,因此与泥沙连通性直接相关^[43-44]。DEBAS 指数的计算是通过将流域出口处的栅格固定为 0,当 SPI 低于固定阈值时,为上游栅格逐次增加一个单位的值。因此在 DEBAS 栅格图中,低值表明在流域尺度上局部侵蚀过程和产沙量之间存在有效的联系,即具有较高的连通性。DENET 指标与 DEBAS 类似,但侧重于河道网络,即纵向连通性。其运算是通过识别河道网络中的低 SPI 区段并根据长度排序来评估的。总的来说,DEBAS 指数和 DENET 指数是基于 GIS 的地貌指标,旨在反映地形对侵蚀和泥沙输送潜力的影响,因此在研究山区盆地的侵蚀和沉积动力学方面具有潜在应用价值,并能够为沉积物管理和优先级制定提供辅助决策支持。

(4) 相对表面连通函数 (Relative surface connection function, RSCf)

降雨发生后,地表水要么积聚在邻近的洼地中,要么形成径流流向下游。随着积水深度的增加,产生局部径流的区域逐渐与下游产生连通,整体径流系数随之增大。相对表面连通函数是一种基于简化的水文过程开

发的连通性指标,主要关注填注过程,忽略了其他因素对于产流的影响,如径流运动速度、汇流时间以及降水入渗^[17]。该指标描述了地表径流网络与出口连通的面积百分比如何随着洼地填充水平的增加而增加,其结果可以看作是一个简化的流量过程图,其中纵轴表示连通比例,横轴表示洼地水深^[45-46]。相对表面连通函数将微地形信息纳入了水文模型,考虑其对径流启动的影响,因此被用来评估微地形变化和地表径流动力学之间的关系,进而反映田间地块粗糙度演变对地表径流连通的影响^[47]。

相对表面连通函数通常存在一个特征点,称为连接阈值,当低于该阈值时,洼地填充量的增加并不导致连通区域面积比例的显著增加,当超过该阈值后,连通区域对洼地填充水平的敏感性急剧增加。类似的, Lane 等^[13]在评估冰川消退对流域泥沙连通性影响过程中提出了“方法断开”和“过程断开”的概念,二者之间的过渡被推测位于上述提及的特征点处。具体而言,“方法断开”是指由于 DEM 数据中的噪声或错误导致的连通中断,“过程断开”是指当流水路径遇到反向坡度时导致的连通中断,因此减少“方法断开”的影响后才能描述实际的地貌过程连通。该研究通过迭代洼地填充算法来模拟不同填洼水平对流域出口所对应的连通面积的影响,最终确定了“过程断开”表征的流域泥沙连通性变化与冰川消退阶段盆地输出的粗泥沙通量演变之间的关系。

(5) 地形湿度指数(Topographic wetness index, TWI)

地形湿度指数是一种用于水文模拟的常用地形指数,由 Beven 和 Kirkby 在降雨-径流模型 TopModel 中开发^[48]。该指数可以通过计算上坡贡献面积和局地表面坡度的自然对数得到,计算过程便捷,同时由于流向算法和地形表达方式的多样存在多种变体,能够满足多场景需求^[49]。地形湿度指数通过对地形参数的计算和分析,可以在复杂的地形条件下揭示地表连接性的模式和特征,因此可通过该指标结果栅格的空间分异特征或高低值集聚形态判断连通性^[50]。

基于一个简单原理,即只有当模型中饱和区域与河道网络之间的所有单元都处于饱和状态时,该饱和区域才能与河道网络相连, Lane 等^[51]提出了一个地形指数的网络指数(Network index, NI)版本。网络指数的计算是通过追踪流水路径上的最低地形指数值来实现的,因为该方法认为沿着连接坡面上某一点与河道网络的流动路径,地形指数的最低值应该控制着该点与河道网络之间通过地表径流的连通性。该指数被证明可以帮助概括连通性的空间变异性,改善对泥沙向河道网络转移通量的估计^[52],此外还被成功用于评估滑坡携带的泥沙向河道网络的输送情况,证明该方法在高分辨率地形数据下表现出良好的效果,并提供了改进预测的可能性^[53]。

2.1.2 直接表征

(1) 连通性指数(Index of connectivity, IC)系列

Borselli 等^[54]开发了一个基于 GIS 的分布式指数来表示流域不同部分之间的潜在连通性,即连通性指数 IC,并将其应用于一个农业集水区。该指数主要关注地形对泥沙连通性的影响,同时也考虑到一些与土地覆盖有关的信息,计算公式如下:

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right)$$

式中 D_{up} 和 D_{dn} 分别表示连通的上坡分量和下坡分量。上坡分量表示该位置处接收上坡泥沙流入的概率,可以通过该公式估算: $D_{up} = \bar{W} \bar{S} \sqrt{A}$, 其中 \bar{W} 是上坡贡献区域的平均权重因子(无量纲), \bar{S} 是上坡贡献区域的平均坡度(m/m), A 是上坡贡献面积(m²)。下坡分量表示泥沙的下行传输潜力,受距离最近汇水区域的潜在流动路径长度和地表特征的影响,估算为: $D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{W_i S_i}$, 其中 d_i 是第 i 个单元流动路径的长度(m), W_i 和 S_i 分别是第 i 个单元的加权因子和坡度。IC 指数值越大则连通性越强。此外还通过对连通性影响因子的细化评估定义了现场连通性指数(Field connectivity index, FIC),其结果可用于验证 IC 结果^[54]。

权重值 W 是 IC 指数的一个重要参数,代表了土地利用和土壤表面特性等地表特征对泥沙运移的阻抗作

用,因此,该因子的确定决定了 *IC* 指数的适用范围。指数开发者 Borselli 等从景观形态和土地覆盖方面考虑,采用了土壤流失方程(USLE-RUSLE)中用于确定作物管理系统在水土流失方面有效性的 *C* 因子作为权重 *W* 进行运算,即 $W = C$ [55]。Chartin 等 [56] 为了整合降雨事件特征对连通性的影响,添加降雨侵蚀力因子 *R* 作为额外权重因子,修改后的连通性指数权重因子 $W = C \times R$, *R* 的计算基于降雨动能 *E* 和最大 30min 雨强 (I_{30})。修改后的连通性指数被用于验证台风对沿海流域泥沙连通性的影响。在阿尔卑斯山流域这种高地环境中,大面积的无植被地区对泥沙运移的阻抗取决于露出地表的岩石和岩屑覆盖层的特征。因此 Cavalli 等 [57] 用地表粗糙度指数 *RI* 代替原模型中的 *C* 因子来表征权重因子,即 $W = 1 - \left(\frac{RI}{RI_{\max}} \right)$,其中 *RI* 通过对地形数据运用移动窗口法计算得到, RI_{\max} 表示区域内 *RI* 的最大值。该团队开发的基于流向的地表粗糙度指数将进一步提升该版本泥沙连通性指数的计算潜力 [58]。为了考虑区域产流特性对泥沙连通性的影响,曲线数也被纳入权重 *W* 因子的计算中 [7,59]。Ortíz-Rodríguez 等基于 Borselli 等 [54] 和 Cavalli 等 [57] 的成果提出了联合 *IC* 指数,即在裸露地区应用地形粗糙度 *RI* 作为权重因子,在植被覆盖和农业地区使用 *C* 因子作为权重因子 [60]。他们指出,这种“联合 *IC*”不会过高估计裸露区域中的连通性。随着诸如空中生物量 [61]、曼宁系数 [12] 等越来越多的参数被纳入权重因子的计算,*IC* 系列指数已成为多情景下泥沙连通性的重要评估手段。

IC 指数主要基于 GIS 数据计算,这意味着它更关注地理空间关系和数据可表达的地表特征,尤其是地形要素。因此 *IC* 指数不能完全反映以缓坡和高径流事件为特征的低洼地区的泥沙连通性,但这也衍生出了 *IC* 指数的异地适用性调整研究。排水网络的发展和持久性指数 (Indice de persistance et développement des réseaux, IDPR) 是一个反映土壤和地下岩层对雨水渗透或分流能力的分布式参数 [67]。Gay 等 [62] 将 IDPR 作为附加因子引入斜率小于 7% 区域的 *IC* 指数计算过程来反映低洼地区的土壤渗透和饱和特性与泥沙连通性之间的关系,以得出更准确的连通性评估结果。修改后的连通性指数如下:

$$IC_{\text{revised}} = \log_{10} \left(\frac{\overline{WS} \sqrt{A} \times \overline{IDPR}}{\sum_i \frac{d_i}{W_i S_i \times IDPR_i}} \right)$$

式中 \overline{WS} 是上坡贡献区域的平均渗透性加权因子, $IDPR_i$ 是第 *i* 个单元的渗透性权重因子。修订后的指数在定义较大范围内的高连通区域方面表现出良好的潜力。

IC 指数的结果依赖于基本输入数据的质量和分辨率,例如 DEM 数据。Cavalli 等利用激光雷达 (LiDAR) 技术生成的高分辨率地形数据为连通性指数的计算提供了更精确的地表信息 [63]。D-无穷算法相较于常用的单流向方法能够模拟发散流,因此更能捕捉真实的流动路径。高分辨率地形数据和 D-无穷算法的结合促使了一个更贴近现实的连通性指数的诞生 [57],并被成功应用于 Dolomites 山脉 Rio Cordon 流域的泥沙源区和泥沙连通性研究 [64]。随着权重值 *W* 量化方法的完善和输入数据质量的提高,*IC* 系列指数已被成功应用于不同环境背景下的流域实际产沙量评估,已成为目前应用最广泛的泥沙连通性指标之一。

(2) 流域尺度连通性指数 (Catchment connectivity index, CCI)

流域连通性指数 CCI 是 Quinoñero-Rubio 等基于 GIS 将不同技术 (实地调查、遥感、建模) 绘制的连通性的多尺度 (山坡、河道、子流域) 因素进行结合而开发的流域尺度泥沙连通性指数 [65]。考虑的因素包括坡面上的运输能力 (Transport capacity, *TC*), 拦沙坝对泥沙的捕获效率 (Trap efficiency, *TE*), 地貌屏障的作用 (Geomorphological barriers, *GF*), 河道中的水流条件 (Flow conditions, *FC*) 和输沙能力 (Sediment transport capacity, *SP*)。

其中, *TC* 基于土壤侵蚀和泥沙输送模型 WaTEM-SEDEM 进行计算,该方法适用于沟壑和溪流侵蚀严重的半干旱地区 [66],公式为 $TC = ktcR \times K \times A^{1.4} \times S^{1.4}$, *ktc* 是表征土地利用影响的因子,通过对 RUSLE 中的 *C* 因子重分类得到, *R* 和 *K* 分别是 RUSLE 中体现降雨侵蚀率和土壤可侵蚀性的系数, *A* 是贡献面积, *S* 为地形坡度。考虑大坝的存储容量和面向的区域, *TE* 通过布朗方程进行计算,并通过对坝体原始体积和基于实地

测量估算的体积计算平均 TE 来反映随着淤积过程逐渐变化的平均拦截能力。 GF 基于在子流域的主河道与支流交汇处的地貌条件进行赋值。 FC 基于河道的流动条件进行赋值,具有持续流量的河道赋值为 1,间歇流量的河道赋值为 0.5。 SP 的计算通过对输沙能力函数^[67]中难以获得的参数进行调整和估算,计算公式为 $SP = A^{1.4} \times S^{1.4}$ 。计算上述因子的流域平均值“ av ”和最大值“ max ”,最终流域连通性指数 CCI 定义为:

$$CCI = \left(\frac{TC_{av}}{TC_{max}} \times \frac{100 - TE_{av}}{100} \times \frac{GF_{av}}{GF_{max}} \times \frac{SP_{av}}{SP_{av,max}} \times \frac{FC_{av}}{FC_{av,max}} \right)$$

流域连通性指数 CCI 组合了多个不同景观要素中影响泥沙连通性的因素,目前已被用于估计西班牙东南部 Alto Taibilla 流域三个情景中的泥沙连通性:①1956 年的土地利用情景作为参考情景,②2006 年有堤坝的实际土地利用情景,③2006 年没有堤坝时土地利用的假设情景。通过多情景下 CCI 模拟结果的对比能够评估流域尺度下自然要素(包括地形、气候等)和人为干扰(包括撂荒、造林等土地利用变化和拦沙坝建设)对泥沙连通过程的影响^[65]。

(3) 简单连通指数(Simplified connectivity index, SCI)

泥沙源区距出口处的距离是诸多连通性指数的基本参数,其确定过程决定了连通性度量的准确性。 $Grauso$ 等认为可以用一个衰减因子来反映泥沙从源区通过沟道网络到达出口的相对距离^[6],这类类似于 IC 指数中的下坡分量^[54],反映出一个潜在规律:即使一个源区提供了大量的泥沙物源,若该源区位于远离出口的位置,则该源区仍难以对出口处的泥沙量产生显著贡献;反之,若一个较小的泥沙源的位置靠近出口,则该源区可能对出口处泥沙量产生显著贡献。基于一个简单假设“出口处泥沙产量与源区距出口距离呈现反比关系”, $Grauso$ 等利用一个泥沙源区的土壤流失量(SL_i)和距离出口处的距离(d_i)提出一个简单的指数来反映单一源区所提供的有效泥沙潜力(SP_i),然后通过 SP_i 的简单平均和归一化获取一个无量纲指数,以反映流域作为一个整体将泥沙从源区转移至出口的能力,即泥沙连通性。简单连通性指数 SCI 最终计算如下:

$$SCI = \text{colog} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \frac{SL_i / SL_{max}}{d_i / d_{max}}}{N} \right)$$

式中, SL_i 为 i 单元的土壤流失量, SL_{max} 为最大土壤流失量, d_i 为 i 单元距出口的距离, d_{max} 是距出口的最大距离, N 是单元总数。

值得注意的是,该指数是基于 $i=1, 2, 3, \dots, N$ 的单元计算的,各单元的土壤流失通常利用模型估算得到,距出口的距离利用沙源位置、河网矢量以及出口位置间的最短距离得到,因此, SCI 受输入数据精度和土壤流失量模拟值的可信度的限制。例如在将其应用于流域产沙量预测时,由于土壤流失量数据与研究时限的不匹配,导致 SCI 与意大利南部 45 个流域的具体产沙量相关性很差,所以该指数在实际应用过程中还需要通过实地观测进行补充和验证^[68]。 $Grauso$ 等同时还提出了一个流域泥沙潜力指数(Specific sediment potential, SSP)用于描述上坡区域产生的泥沙量,并通过在实例研究说明 SCI 和 SSP 可以同时或根据需求进行交替使用来反映流域泥沙潜力^[6]。

(4) 泥沙连通概率

为了建立一个基于泥沙连通性的流域侵蚀框架, $Mahoney$ 等利用概率论建立了一个依赖于泥沙供给、剥离、输送和缓冲的交叉概率的泥沙连通性预测模型,并通过集成水文连通性来考虑泥沙输运的动态连通性^[69]。

流域侵蚀模拟框架涉及三个阶段的模型模拟:第一阶段包括一个动态水文模型,提供关于土壤水分和径流深度的连续模拟结果,第二阶段量化泥沙从高地输送到河道河段的路径和缓冲,以产生一个“泥沙连通概率”,第三个阶段将“泥沙连通概率”与侵蚀模型相结合,输出土壤流失和泥沙输送的分布式结果。其中第二阶段的结果可以被看作一个泥沙连通性指数,即泥沙连通概率。泥沙供应、剥离和运移条件是泥沙连通的基础环节,因此该指数通过概率相交反映这些条件共同发生的必要性,逻辑运算关系如下:

$$P(C) = P(S) \cap P(D_H \cup D_{NH}) \cap P(T_H \cup T_{HN}) \cap \{1 - P(B)\}$$

式中, S 表示泥沙供应, D_H 表示水文剥蚀, D_{NH} 表示非水文剥蚀, T_H 表示水文输送, T_{HN} 表示非水文输送, B 表示缓冲。其中非水文过程指水流以外的自然或人为因素, 如风蚀、人为活动等。通过数学上的乘法和求和来实现概率的交与并, 泥沙连通概率最终表示为:

$$P(C) = \{P(S)\} \times \{P(D_H) + P(D_{NH}) - P(D_H)P(D_{NH})\} \times \{P(T_H) + P(T_{HN}) - P(T_H)P(T_{HN})\} \times \{1 - P(B)\}$$

将方程中的各个概率参数化为一组离散的分段函数, 根据每个地理空间像元的特征估计六个概率, 然后对离散化结果进行积分, 以提供适用于整个流域的连续分布函数。

鉴于泥沙粒径分布的不均匀性、湍流的随机性和景观的不均匀性, 概率论长期以来常被用来解决泥沙运移问题^[54]。泥沙连通概率提供了一种综合考虑地貌异质性和水文过程的方法, 能够更准确地描述和模拟泥沙运移的多样性和动态性, 在预测流域产沙量、改进泥沙运移模型等方面具有重要优势。

(5) 网络指数

将流域看作一个级联系统, 其单元间是由汇流路径和泥沙通量相联系的, 这暗示网络可以作为一个直观的数据结构结合图论分析来研究泥沙连通性。此时, 研究的基本单元抽象为节点, 连接节点的边代表通过地貌过程建立的泥沙运移路径, 随后往往通过评估该网络的特征值来反映泥沙连通性。因此, 建立泥沙连通性的网络指数通常需要三步: ①划分基本单元, 即节点, ②建立节点间的边连接, ③网络评价。

划分基本单元的目的是将流域进行离散化, 通常有基于栅格、山坡、子流域、土地利用地块等方法^[70-71]。在面向对象的流域景观表达的研究中提出, 基本研究单元应尽可能接近地用与过程相关的功能对象来表示, 从而避免单一栅格导致的地貌属性的离散化^[72]。水文响应单元 (Hydrological response units, HRU) 是水文学研究中最常用基本单元划分方法, 能充分反映流域坡度、土地利用及土壤类型等属性的空间异质性和相似性, 成为许多分布式水文模型的基础^[73]。类似的还有分组响应单元 (Grouped response unit, GRU)、典型单元面积 (Representative elemental area, REA) 等^[74]。在连通性研究中, 地貌过程单元 (Geomorphologic process units, GPU)^[38]、连通响应单元 (Connectivity response units, CRUs)^[75]、地貌细胞 (Geomorphologic cell)^[76] 被陆续提出, 用于分析各种地貌过程相互作用、泥沙运移路径、坡地-河道耦合以及侵蚀和沉积的主导区域的识别。

目前已经有一些研究尝试使用网络中的拓扑关系来描绘地貌耦合, 例如滑坡与河道网络、泥沙运移与道路和伐木滑道之间的交汇过程^[77-78]。唐政洪等通过提取最大坡降方向来判别水沙运移方向, 将其与流域地块单元图叠加分析后生成了基于地块的水沙运移网络^[79]。Gascuel-Oudou 等提出了一种包括树篱和道路网络等景观要素的拓扑表达, 考虑了每个农田或地块上的地表水流入和出口以及其贡献面积, 将流域表达为一组独立的通往河流的树状网络结构^[72, 80]。动态连通网络框架是在网络拓扑和河道特征的基础上考虑粒子输运过程动力学开发的, 能够更好的对流域系统的结构和动力学进行建模, 进而模拟水沙运动^[81-82]。虽然其中涉及大量线性系统理论假设, 可能对非线性的系统响应不够准确, 但这是一次有意义的尝试来理解泥沙输送的时空结构。

目前已有较多用于网络结构特征评价的指数, 例如基于连通节点之间距离的平均路径长度, 可以用来表征网络中地块间联系的紧密程度和水沙运移通道的流动效率。反映网络内部结构有效性的网络环度指数、网络连接度指数, 以及网络连通性指数可以用于反映连通性^[83-85]。Cossart 和 Fressard^[5] 基于介数中心度和可达性提出了第一个基于网络的泥沙连通性指数 (Network structural connectivity index, NSC), 表达如下:

$$NSC_i = \frac{F_i}{Shi_i}$$

式中, F_i 为潜在径流指数, 描述了地块 j 的水沙经过地块 i 到达出口的路径数量占地块 j 的水沙到达出口的所有路径总数量的比例, 因此可用于反映目标地块输送泥沙到出口的潜在贡献, 值越大则泥沙连通性越强。 Shi_i 为可达性指数, 描述了地块 i 与相连通的所有地块之间最短距离的总和, 并基于总路径长度进行归一化。 Shi_i 描述了地块 i 的存在对水沙运移的路径长度的影响, 因此可以用来评估目标地块与泥沙级联的连接程度, 值越小则泥沙连通性越强。为了更好地确定各地块泥沙量的高估或低估现象, 该研究团队在计算了网络结构连

通性 NSC 指数的基础上,通过将潜在径流指数 F_i 与可达性指数 Shi_i 进行线性回归创建了一个相对更稳定的流量残差(Residual flow, RF)指数,表达如下:

$$RF_i = F_i - (a \times Shi_i + b)$$

指数值为正则表示模拟的泥沙量高于该节点位置的预期值,这意味着网络结构和路径的几何形状有利于泥沙的收集和输送。在这种情况下,泥沙连通性处于较高水平。反之,负值则说明在缓冲区、障碍物、覆盖层的影响下,泥沙输送受到阻碍,连通性较低^[86]。

2.2 表征指数对比分析

为了充分对比不同连通性表征指数之间的差异,本文基于第 1 节提出的泥沙连通性概念框架对表征指数进行了对比分析,并列举了各指数的优缺点及应用范围(表 2)。目前的指数成果绝大多数属于框架的内圆范畴,即基于地貌系统的内在特征构建,用于处理地貌系统的结构连通性。其中,结构特性是最基础的要素,例如地形、土地覆被等。以地形为例阐述结构要素在各指数中输入方式的差异:①坡度作为重要的地形特征之一可被直接作为指数的输入参数,例如 TWI 指数、IC 系列指数和 CCI 指数,坡度还被用于计算势能作用下的水流功率,因此被纳入 DEBAS 指数和 DENET 指数。②地形要素通过水文分析获取贡献面积和水流路径,进而成为 ECA、SCA、TWI、SCI 以及网络指数的重要计算步骤,水流路径也是 IC 指数下坡分量计算的基础支撑。③地形是影响坡面侵蚀的重要因素,也是诸多土壤侵蚀预测模型的坡度坡长输入,可用于模拟坡面的土壤侵蚀量,为 SDR 和 SCI 指数提供内部流失总量估计。功能特性主要考虑土壤在水分存储、水力传导方面的特性,以及土壤可蚀性等。由于功能特性需要诸多实测指标来衡量,大范围区域的确定受到限制,因此在指标中应用较少。在 CCI 指数中,土壤可蚀性因子被用来计算坡面上的运输能力 TC 参数,在 Kalantari 和 Hooke 改编的两个 IC 版本中,反映地表土壤的持水能力和径流产生潜力的曲线数被作为权重因子参与指标计算。

由内在特征反映的结构连通性并不意味着泥沙的实际转移,在外力作用下发生地貌过程相互作用才能建立功能连通。仅有极少数指数涉及框架的中环范畴:Chartin 等对 IC 的改编版本将降雨侵蚀力作为附加因子纳入,可以被视为将结构连通层面的原始 IC 指数向反映功能连通方向的努力。相对表面连通函数和泥沙连通概率都考虑了水文过程,其中相对表面函数通过模拟降雨强度高于土壤入渗速率情况下的填洼和泥沙存储过程,建立了地形决定的结构连通性和降雨过程中的功能连通性之间的关系,泥沙连通性概率通过耦合泥沙分离、运输和沉积过程描述产生泥沙实际连通的概率,因此这两个概念以及由此产生的指数具有功能连通意义。此外,Czuba 等提出的动态连通网络框架利用网络拓扑、河道特性和沉积学响应来识别泥沙输送的同步和放大效应,属于功能连通范畴。

泥沙连通性概念框架的外环范畴描述了连通的尺度问题。从时间尺度上来说,大多数指数描述了恒定的、结构性的连通,例如 IC 系列指数。但是通过考虑不同时期的土地利用变化和降雨量,IC 系列指数也可以反映泥沙连通性的季节性^[87]或年际变化^[12, 61]。描述功能连通过程的指数通常是动态的,例如动态连通网络框架和泥沙连通概率通过和侵蚀模型相结合,可以输出时间可变的泥沙通量。从空间尺度上看可以分为空间分辨率和研究区域两个层面。由于所有连通性指数都需要基础空间数据作为输入,因此受到基础数据的质量和分辨率影响。以 DEM 数据为例,过高的分辨率可能会因为噪声或错误而产生一些伪断开,而过低的分辨率可能会导致重要的地形特征被忽视,因此可能存在一个最佳分辨率的问题。从研究区域层面看,SDR 和 SCI 指数用一个集总式的概念描述了流域尺度的总体连通性。ECA 和 SCA 当用贡献区域的总面积来衡量连通性时,属于集总式指标,当涉及贡献区域的空间分布时则属于分布式指标。IC 系列指数则属于典型的描述流域连通性空间分异的分布式指标。另外,由于应用于不同研究区域的指数可用于阐述不同类型的连通性,除了专注于河流形态和结构的 DENET 指数描述纵向连通性,大多数指数较为灵活。例如 IC 系列指数,当研究对象是坡面泥沙向出口的运移过程时,指数反映横向连通性,当研究对象是河道网络时,指数反映纵向连通性。

表 2 泥沙连通性指数对比分析表

Table 2 Comparison of sediment connectivity indices

指数名 [参考文献] Indices [reference]	建立过程类别 Type based on the establishment process	空间尺度 Spatial scale	时间尺度 Time scale	优点 Advantages	不足 Disadvantages	适用范围 Applicable situation
泥沙输移比 (SDR) [25] Sediment delivery ratio	功能连通	流域	动态	计算复杂度低; 研究时间长, 成果广泛, 几乎覆盖所有大型流域和主要生产区。	将流域内部作为黑匣子, 对泥沙从源区到汇/出口运移的空间和时间模式了解甚少。	适用于配备了水文站观测, 仅需要了解流域总体泥沙输移效率或预测流域产沙量的场景。
有效集水区 (ECA) [35] Effective catchment area	结构连通	流域	恒定	数据需求低, 仅需 DEM 即可计算。	评估结果的准确度高度依赖坡度阈值的确定和 DEM 数据精度。	适用于具有高精度地形数据的高地形起伏流域。
水流功率 (DEBAS) [43] Stream power DEBAS	结构连通	流域, 河道	恒定	计算复杂度低; 数据需求低。	是基于 GIS 的地貌指标, 仅反映地形对泥沙输送潜力的影响。	适用于地形特征明显的山区盆地。
水流功率 (DENET) [44] Stream power DENET	结构连通	河道	恒定	计算复杂度低; 数据需求低。	是基于 GIS 的地貌指标, 仅反映地形对泥沙输送潜力的影响。	适用于地形特征明显的山区盆地的河道泥沙连通性评价。
相对表面连通函数 (RSGF) [47] Relative surface connection function	功能连通	坡面	恒定	考虑了微地形信息对径流启动的影响。	计算过程受到 DEM 数据噪声的强烈影响, 连通阈值的确定十分关键。	评估微地形变化对地表径流连通的影响。
网络指数 (NI) [51] Network index	结构连通	坡面, 流域	恒定	可以反映复杂地形条件下地表连通模式的空间变异性。	指数通过追踪最低 TWI 值实现, 受流向算法选择的影响。	该方法在高分辨率地形数据下表现良好。
连通性指数 (IC) [54] Index of connectivity	结构连通	坡面, 流域	恒定	创建上坡分量 and 下坡分量反映任意区域泥沙接收和下行的潜力, 同时通过权重值 W 反映了土地利用格局对泥沙转移的影响。	可能会高估裸露区域的连通性。	适用于植被覆盖度高的农业集水区。
修改版连通性指数 [56] Revised connectivity index	结构-功能	坡面, 流域	动态	考虑了降雨事件特征对连通性的影响。	仅通过在权重值 W 中添加降雨侵蚀力因子 R 反映降雨影响略显单薄。	适用于植被覆盖度高, 具有降雨监测数据的农业集水区。
修改版连通性指数 [57-58] Revised connectivity index	结构连通	坡面, 流域	恒定	考虑了无植被地区地表岩屑对连通性的影响。	计算地表粗糙度时, 移动窗口的尺寸选择影响计算结果。	适用于地表植被覆盖状况差异的高地环境。
联合连通性指数 [60] Joint index of connectivity	结构连通	坡面, 流域	恒定	为植被覆盖区和非植被覆盖区赋予不同的权重值 W, 同时考虑植被和微地形的影响。	计算复杂度较高。	适用于绝大多数集水区。
修改版连通性指数 [62] Revised connectivity index	结构连通	坡面, 流域	恒定	能够反映低洼地区的土壤渗透和饱和特性与泥沙连通性之间的关系。	计算复杂度高; 对输入数据要求高。	适用于以缓坡和高径流事件为特征的高连通区域。
流域连通性指数 (CCI) [65] Catchment connectivity index	结构连通	流域	恒定	同时考虑了坡面、河道以及子流域中的泥沙连通的因素, 包括拦沙坝、地貌屏障、河道中的水流条件等。	计算复杂度高; 对输入数据要求高。	适用于景观复杂, 受到人为筑坝等扰动的大型流域。
简单连通指数 (SGI) [6] Simplified connectivity index	结构连通	流域	恒定	考虑了泥沙源区产沙量和相对位置对泥沙连通的影响。	计算复杂度高; 评估结果的准确度受土壤流失模拟值的影响。	适用于有侵蚀产沙实地监测数据的区域。
泥沙连通概率 [69] The probability of sediment connectivity	功能连通	坡面, 流域	动态	综合考虑了地貌异质性和水文过程。	计算复杂度高; 对于泥沙供应、剥离和运移的概率评估困难。	适用于评估连通性动态变化, 并结合侵蚀模型预测泥沙通量的场景。
基于网络的泥沙连通性指数 (NSC) [5] Network structural connectivity index	结构连通	流域	恒定	使用网络模型模拟泥沙级联系统, 可以反映各节点 (地貌单元) 与级联系统的连接程度。	计算复杂度高。需要构建网络拓扑关系。	适用于评价每个地貌单元的连通程度。

3 展望

近年来,泥沙连通性成为土壤侵蚀研究的热点议题,现已涌现诸多有价值的指数或模型成果来表征不同类型不同尺度的泥沙连通性。但目前存在一些局限:

(1) 功能连通性指标体系严重缺失。虽然有一些结构连通性指数在通过考虑动力学过程和外部驱动后逐步与功能连通间建立了联系,但是绝大部分指数表征的是静态的,结构性的连通。

(2) 泥沙连通性指数在量化连通性时空分异方面的不足。受气候、水文过程、植被生长以及人为活动等因素的影响,泥沙连通过程在时间和空间上具有高度变异性。现有的静态、集总式的连通性指数能在多大程度上解释或预测地貌系统的行为是值得讨论的问题。

(3) 缺乏通用指标体系。目前的指数受参数输入和数据精度的影响均局限于某一适用范围,目前还未建立一个能够满足广泛应用场景的通用指标体系。

因此,描述功能连通的、动态的、具有通用性的泥沙连通性表征模型面临着迫切的需要。由于结构连通性对解释或预测功能连通性至关重要,因此可以通过审查静态的结构性指数在外力驱动情景下与功能连通性之间的关系来促进对结构连通指数与地貌过程之间的联系的理解,同时促进功能连通性指数的开发。此外,网络和图论在评价泥沙连通性方面具有巨大潜力。通过将实际地块和运移关系抽象为节点和边来构建网络结构,地貌系统内部的结构和连接方式能够被更清晰地表达和可视化。而图论提供了丰富的数学理论和算法用于评价网络特征和效率。此外,网络分析能够兼顾局部特征和整体特征的表达,并允许许多尺度的转换,例如借助网络聚合可以实现小尺度向大尺度的上升,或者通过对底层数据的修改来模拟节点或边的增加或删除以反映不同时间或利用情景的连通性变化。然而,如何建立图形属性和地貌系统行为之间的联系将成为发展网络连通性模型最主要的问题。

参考文献(References):

- [1] Bracken L J, Croke J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 2007, 21(13): 1749-1763.
- [2] Fryirs K A, Brierley G J, Preston N J, Kasai M. Buffers, barriers and blankets: the (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *CATENA*, 2007, 70(1): 49-67.
- [3] Brierley G, Fryirs K, Jain V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. *Area*, 2006, 38(2): 165-174.
- [4] Hooke J. Coarse sediment connectivity in river channel systems: a conceptual framework and methodology. *Geomorphology*, 2003, 56(1/2): 79-94.
- [5] Cossart É, Fressard M. Assessment of structural sediment connectivity within catchments: insights from graph theory. *Earth Surface Dynamics*, 2017, 5(2): 253-268.
- [6] Grauso S, Pasanisi F, Tebano C. Assessment of a simplified connectivity index and specific sediment potential in river basins by means of geomorphometric tools. *Geosciences*, 2018, 8(2): 48.
- [7] Hooke J, Sandercock P, Cammeraat L H, Lesschen J P, Borselli L, Torri D, Meerkerk A, van Wesemael B, Marchamalo M, Barbera G, Boix-Fayos C, Castillo V, Navarro-Cano J A. Mechanisms of degradation and identification of connectivity and erosion hotspots. *Combating Desertification and Land Degradation*. Cham: Springer, 2017: 13-37.
- [8] Wohl E, Brierley G, Cadol D, Coulthard T J, Covino T, Fryirs K A, Grant G, Hilton R G, Lane S N, Magilligan F J, Meitzen K M, Passalacqua P, Poepl R E, Rathburn S L, Sklar L S. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(1): 4-26.
- [9] López-Vicente M, Álvarez S. Influence of DEM resolution on modelling hydrological connectivity in a complex agricultural catchment with woody crops. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(7): 1403-1415.
- [10] Calsamiglia A, García-Comendador J, Fortesa J, López-Tarazón J A, Crema S, Cavalli M, Calvo-Cases A, Estrany J. Effects of agricultural drainage systems on sediment connectivity in a small Mediterranean lowland catchment. *Geomorphology*, 2018, 318: 162-171.
- [11] 王镛华, 信忠保, 梁潇瑜. 植被和梯田对黄土高原小流域泥沙连通性的影响. *生态学报*, 2023, 43(9): 3756-3765.
- [12] Persichillo M G, Bordoni M, Cavalli M, Crema S, Meisina C. The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides. *CATENA*, 2018, 160: 261-274.
- [13] Lane S N, Bakker M, Gabbud C, Micheletti N, Saugy J N. Sediment export, transient landscape response and catchment-scale connectivity following rapid climate warming and Alpine glacier recession. *Geomorphology*, 2017, 277: 210-227.
- [14] Marchamalo M, Hooke J M, Sandercock P J. Flow and sediment connectivity in semi-arid landscapes in SE Spain: patterns and controls. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(4): 1032-1044.
- [15] Heckmann T, Cavalli M, Cerdan O, Foerster S, Javaux M, Lode E, Smetanová A, Vericat D, Brardinoni F. Indices of sediment connectivity:

- opportunities, challenges and limitations. *Earth-Science Reviews*, 2018, 187: 77-108.
- [16] 严晰芹, 焦菊英, 唐柄哲, 梁越. 泥沙连通性研究方法进展. *泥沙研究*, 2021, 46(2): 59-65.
- [17] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性. *水科学进展*, 2021, 32(2): 295-308.
- [18] Cerdan O, Le Bissonnais Y, Govers G, Lecomte V, van Oost K, Couturier A, King C, Dubreuil N. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *Journal of Hydrology*, 2004, 299(1/2): 4-14.
- [19] Lange J. Dynamics of transmission losses in a large arid stream channel. *Journal of Hydrology*, 2005, 306(1/2/3/4): 112-126.
- [20] Lu H, Moran C J, Sivapalan M. A theoretical exploration of catchment-scale sediment delivery. *Water Resources Research*, 2005, 41(9): 1-15.
- [21] Walling D E. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 1983, 65(1/2/3): 209-237.
- [22] 牟金泽, 孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比. *泥沙研究*, 1982(2): 60-65.
- [23] 李林育, 焦菊英, 陈杨. 泥沙输移比的研究方法及成果分析. *中国水土保持科学*, 2009, 7(6): 113-122.
- [24] 张晓明, 曹文洪, 周利军. 泥沙输移比及其尺度依存研究进展. *生态学报*, 2014, 34(24): 7475-7485.
- [25] 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀与水土保持防护体系. *中国水土保持*, 1983(6): 27-30.
- [26] 赵晓光, 石辉. 黄土塬区坡面及小集水区泥沙输移比变化特征. *山地学报*, 2002, 20(6): 718-722.
- [27] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 眭国平, 杨遂平. 红壤坡地侵蚀定位土芯 Eu 中子活化示踪研究. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2003, 29(4): 361-367.
- [28] 张加琼, 尚月婷, 白茹茹, 殷敏峰, 党真, 杨明义, 肖海. 稀土元素示踪法在土壤侵蚀与泥沙来源研究中的应用. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 55-61.
- [29] 刘毅, 张平. 长江上游流域地表侵蚀与河流泥沙输移. *长江科学院院报*, 1995, 12(1): 40-44.
- [30] 文安邦, 张信宝, 王玉宽, 贺廷荣, 王建文. 云贵高原区龙川江上游泥沙输移比研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 139-141.
- [31] Ebisemiju F S. Sediment delivery ratio prediction equations for short catchment slopes in a humid tropical environment. *Journal of Hydrology*, 1990, 114(1/2): 191-208.
- [32] 张光科, 刘东, 方铎. 山区流域泥沙输移比计算公式. *成都科技大学学报*, 1996, 28(6): 85-90.
- [33] 张光科, 刘东, 方铎. 山区流域坡面径流侵蚀和泥沙输移分析. *四川联合大学学报: 工程科学版*, 1997, 29(6): 12-20.
- [34] Kumar R, Jain V, Prasad Babu G, Sinha R. Connectivity structure of the Kosi megafan and role of rail-road transport network. *Geomorphology*, 2014, 227: 73-86.
- [35] Fryirs K A, Brierley G J, Preston N J, Spencer J. Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter Catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology*, 2007, 84(3/4): 297-316.
- [36] Lisenby P E, Fryirs K A. Sedimentologically significant tributaries; catchment-scale controls on sediment (dis)connectivity in the Lockyer Valley, SEQ, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(10): 1493-1504.
- [37] Nicoll T, Brierley G. Within-catchment variability in landscape connectivity measures in the Garang Catchment, upper Yellow River. *Geomorphology*, 2017, 277: 197-209.
- [38] Wichmann V, Heckmann T, Haas F, Becht M. A new modelling approach to delineate the spatial extent of alpine sediment cascades. *Geomorphology*, 2009, 111(1): 70-78.
- [39] Haas F, Heckmann T, Wichmann V, Becht M. Quantification and Modeling of Fluvial Bedload Discharge from Hillslope Channels in two Alpine Catchments (Bavarian Alps, Germany). *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 2011, 55(3): 147-168.
- [40] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展. *水科学进展*, 2001, 12(3): 395-402.
- [41] D'Haen K, Duser B, Verstraeten G, Degryse P, De Brue H. A sediment fingerprinting approach to understand the geomorphic coupling in an eastern Mediterranean mountainous river catchment. *Geomorphology*, 2013, 197: 64-75.
- [42] 王清源, 张乐涛, 魏仪媛, 何梦真. 基于能量的坡面侵蚀性径流及其水沙传递关系. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 151-157.
- [43] Marchi L, Dalla Fontana G. GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology*, 2005, 48(2): 218-228.
- [44] Dalla Fontana G, Marchi L. GIS indicators for sediment sources study in Alpine Basins. *IAHS-AISH Publication*, 1998, 248: 553-560.
- [45] Antoine M, Javaux M, Bièdiers C. What indicators can capture runoff-relevant connectivity properties of the micro-topography at the plot scale? *Advances in Water Resources*, 2009, 32(8): 1297-1310.
- [46] Van Nieuwenhuyse B H J, Antoine M, Wyseure G, Govers G. Pattern-process relationships in surface hydrology: hydrological connectivity expressed in landscape metrics. *Hydrological Processes*, 2011, 25(24): 3760-3773.
- [47] Peñuela A, Darboux F, Javaux M, Bièdiers C L. Evolution of overland flow connectivity in bare agricultural plots. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(11): 1595-1613.
- [48] Beven K J, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [49] Ali G, Birkel C, Tetzlaff D, Soulsby C, McDonnell J J, Tarolli P. A comparison of wetness indices for the prediction of observed connected saturated areas under contrasting conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(3): 399-413.
- [50] Janczewicz K, Migoń P, Kasprzak M. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index. *The Science of the Total Environment*, 2019, 656: 1046-1062.
- [51] Lane S N, Brookes C J, Kirkby M J, Holden J. A network-index-based version of TOPMODEL for use with high-resolution digital topographic data. *Hydrological Processes*, 2004, 18(1): 191-201.
- [52] Lane S N, Reaney S M, Heathwaite A L. Representation of landscape hydrological connectivity using a topographically driven surface flow index. *Water Resources Research*, 2009, 45(8): W08423.
- [53] Reid S C, Lane S N, Montgomery D R, Brookes C J. Does hydrological connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environments? *Geomorphology*, 2007, 90(3/4): 263-282.
- [54] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*, 2008, 75(3): 268-277.

- [55] Wischmeier W, Smith D. Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. U S Department of Agriculture Handbook No 537, 1978: 285-291.
- [56] Chartin C, Evrard O, Lacey J P, Onda Y, Ottl\`e C, Lef\`evre I, Cerdan O. The impact of typhoons on sediment connectivity: lessons learnt from contaminated coastal catchments of the Fukushima Prefecture (Japan). *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(2): 306-317.
- [57] Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine Catchments. *Geomorphology*, 2013, 188: 31-41.
- [58] Trevisani S, Cavalli M. Topography-based flow-directional roughness: potential and challenges. *Earth Surface Dynamics*, 2016, 4(2): 343-358.
- [59] Kalantari Z, Cavalli M, Cantone C, Crema S, Destouni G. Flood probability quantification for road infrastructure: data-driven spatial-statistical approach and case study applications. *The Science of the Total Environment*, 2017, 581/582: 386-398.
- [60] Ortíz-Rodríguez A J, Borselli L, Sarocchi D. Flow connectivity in active volcanic areas: Use of index of connectivity in the assessment of lateral flow contribution to main streams. *CATENA*, 2017, 157:90-111. doi: 10.1016/j.catena.2017.05.009
- [61] Lizaga I, Quijano L, Palazón L, Gaspar L, Navas A. Enhancing connectivity index to assess the effects of land use changes in a Mediterranean Catchment. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 663-675.
- [62] Gay A, Cerdan O, Mardhel V, Desmet M. Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(1): 280-293.
- [63] Cavalli M, Marchi L. Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, 8(2): 323-333.
- [64] Cavalli M, Tarolli P, Dalla Fontana G, Marchi L. Multi-temporal analysis of sediment source areas and sediment connectivity in the Rio Cordon Catchment (Dolomites). *Rendiconti Online Della Società Geologica Italiana*, 2016, 39: 27-30.
- [65] Quiñonero-Rubio J M, Boix-Fayos C, de Vente J. Desarrollo y aplicación de un índice multifactorial de conectividad de sedimentos a escala de cuenca. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, 2013, 39(2): 203-223.
- [66] Verstraeten G, Prosser I P, Fogarty P. Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee Catchment, Australia. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(3/4): 440-454.
- [67] Dietrich W E, Bellugi D G, Sklar L S, Stock J D, Heimsath A M, Roering J J. *Geomorphic Transport Laws for Predicting Landscape form and Dynamics*. Prediction in Geomorphology. Washington, D. C: American Geophysical Union, 2013: 103-132.
- [68] Grauso S, Pasanisi F, Tebano C, Grillini M, Peloso A. Investigating the sediment yield predictability in some Italian Rivers by means of hydro-geomorphometric variables. *Geosciences*, 2018, 8(7): 249.
- [69] Mahoney D T, Fox J F, Al Aamery N. Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 862-883.
- [70] 胡连伍, 王学军, 罗定贵, 蒋颖. 不同子流域划分对流域径流、泥沙、营养物模拟的影响——丰乐河流域个例研究. *水科学进展*, 2007, 18(2): 235-240.
- [71] 舒栋才, 程根伟, 林三益. 基于 DEM 的岷江上游数字流域的离散化. *四川大学学报: 工程科学版*, 2004, 36(6): 6-11.
- [72] Gascuel-Oudou C, Arousseau P, Doray T, Squidivant H, Macary F, Uny D, Grimaldi C. Incorporating landscape features to obtain an object-oriented landscape drainage network representing the connectivity of surface flow pathways over rural catchments. *Hydrological Processes*, 2011, 25(23): 3625-3636.
- [73] 宁吉才, 刘高焕, 刘庆生, 谢传节. 水文响应单元空间离散化及 SWAT 模型改进. *水科学进展*, 2012, 23(1): 14-20.
- [74] 张旭, 蒋卫国, 周廷刚, 唐宏. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分——以洞庭湖为例. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(4): 17-21.
- [75] Singh M, Tandon S K, Sinha R. Assessment of connectivity in a water-stressed wetland (Kaabar Tal) of Kosi-Gandak interfan, North Bihar Plains, India. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(13): 1982-1996.
- [76] Poepl R E, Parsons A J. The geomorphic cell: a basis for studying connectivity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(5): 1155-1159.
- [77] Korup O. Geomorphic imprint of landslides on alpine river systems, southwest New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(7): 783-800.
- [78] Sidle R C, Sasaki S, Otsuki M, Noguchi S, Rahim Nik A. Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skid trails. *Hydrological Processes*, 2004, 18(4): 703-720.
- [79] 唐政洪, 蔡强国, 张光远, 李忠武, 刘高焕, 冯九梁. 基于地块间水沙运移的黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙模型. *泥沙研究*, 2001(5): 48-53.
- [80] Arousseau P, Gascuel-Oudou C, Squidivant H, Trepos R, Tortrat F, Cordier M O. A plot drainage network as a conceptual tool for the spatial representation of surface flow pathways in agricultural catchments. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(2): 276-288.
- [81] Czuba J A, Foufloula-Georgiou E. A network-based framework for identifying potential synchronizations and amplifications of sediment delivery in river basins. *Water Resources Research*, 2014, 50(5): 3826-3851.
- [82] Czuba J A, Foufloula-Georgiou E. Dynamic connectivity in a fluvial network for identifying hotspots of geomorphic change. *Water Resources Research*, 2015, 51(3): 1401-1421.
- [83] 刘建华, 王戈, 杨澜, 刘晓希, 于强, 岳德鹏. 包头市草原景观斑块耦合网络结构特征研究. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 196-203.
- [84] 刘祥平, 张贞, 李玲玉, 李明欣. 多维视角下天津市生态网络结构演变特征综合评价. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1554-1562.
- [85] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价. *地理研究*, 2009, 28(2): 284-292.
- [86] Fressard M, Cossart E. A graph theory tool for assessing structural sediment connectivity: development and application in the Mercurey vineyards (France). *The Science of the Total Environment*, 2019, 651(Pt 2): 2566-2584.
- [87] Foerster S, Wilczok C, Brosinsky A, Segl K. Assessment of sediment connectivity from vegetation cover and topography using remotely sensed data in a dryland catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(12): 1982-2000.