

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220240

基于土壤侵蚀角度的坡面水文连通性研究进展

陈良¹, 胡砚霞¹, 李振炜^{2,3}, 徐宪立^{2,3}, 于兴修¹

(1. 湖北大学 资源环境学院, 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125;

3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要:坡面水文连通性定量表征指标主要有径流流路长度、染色示踪法、连通性指数、相对地表连通指数、地形湿度指数、方向性渗透指数等, 综合分析认为, 水文连通性未来的研究应聚焦于以下几个方面: (1) 强化不同区域的坡面水文连通性对比研究; (2) 明确不同坡面条件对水文连通性的影响机制; (3) 建立坡面水文连通性定量表征方法体系; (4) 解析土壤侵蚀与坡面水文连通性的关系。

关键词: 土壤侵蚀; 坡面; 水文连通性; 连通性指数

中图分类号: S157; P33

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2023)06-0014-06

1 坡面水文连通性概念概述

20世纪30年代WHYBORN最早在数学领域提出了循环连通性定理^[1]。连通性是指系统内部物质、能量和有机物转移与传递的难易程度, 依据空间方向, 可以将连通性分为横向连通性、纵向连通性和垂向连通性^[2]。20世纪70年代后连通性概念广泛应用于地质学、地貌学和水文学^[3-4], 近10年水文连通性研究得到了发展, 并成为水文学的研究热点^[5-8]。涉水领域根据研究对象不同可以分为景观连通性、水文连通性和泥沙连通性^[9]。

水文连通性是指以水为介质, 有机质和能量等在地球不同圈层之间进行交换和转移的过程, 又称为水文连接度或水文连通度^[10-12]。水文连通性具有时空特性, 降雨的季节变化和年际变化都会引起连通性响应, 因此, 水文连通性问题是一个四维问题, 包括横向、纵向、垂向和时间^[2]。水文连通性按照研究尺度一般分为坡面水文连通性和流域水文连通性, 按照迁移范围可分为狭义水文连通性和广义水文连通性^[13]。

坡面水文连通性按照坡面空间结构与径流的关系可以划分为静态水文连通性和动态水文连通性, 静态水文连通性指坡面的空间结构, 如影响径流产生的基岩土壤等的空间分布特征; 动态水文连通性是指坡面空间结构在产流和径流过程中产生的影响和作用^[14]。按照结构和功能可以划分为坡面结构水文连通性和坡面功能水文连通性, 坡面结构水文连通性是指景观单元相邻或物理连接的程度, 坡面功能水文连通性是指该系统的多个结构特征之间的相互作用影响地貌、生态和水文过程的方式^[7]。

目前我国在水土流失较为严重的区域开展了许多研究工作, 例如黄土高原地区, 通过自然降雨或人工模拟降雨探讨坡面水文连通性和土壤侵蚀的关系并取得了许多进展。然而, 在自然状态下坡面上的各种因素并非是稳态的, 影响水文连通性的主控因素也并非一成不变, 因而明确坡面水文连通性的主要影响机制以及对土壤侵蚀的影响仍然需系统研究, 此研究可为改善区域生态环境、“因地制宜”制定合理的水土保持政策提供科学依据。

收稿日期: 2022-07-01

网络首发日期: 2023-10-23

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20231020.1439.012.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“喀斯特坡面土壤-表层岩溶带水文连通性对泥沙输移过程的影响机制”(41977073); 国家自然科学基金重点基金项目“西南黄壤区不同尺度土壤侵蚀与泥沙运移规律耦合关系”(41730748); 中科院青年创新促进会项目人才项目(2020359)

作者简介: 陈良(1997—), 男, 汉族, 山东人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: chenlianghub@163.com

通信作者: 李振炜(1986—), 男, 汉族, 山东人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为土壤侵蚀与生态水文。E-mail: lizhenwei337@isa.ac.cn

2 坡面水文连通性和土壤侵蚀的关系

坡面水文连通性和土壤侵蚀紧密相关,当坡面泥沙来源充足时,随着水流挟沙力增大,径流输沙率增加,土壤侵蚀增强,此时坡面水文连通性和土壤侵蚀间呈显著正相关;而当泥沙供给不足时,坡面水文连通性强但土壤侵蚀强度未必大^[2],例如:地表硬化后水文连通性增强,硬化地面由于泥沙极少,所以土壤侵蚀很弱。降雨强度以及坡面条件在影响水文连通性的同时影响土壤侵蚀强度,如强降雨会导致坡面径流增大,细沟和切沟的形成会显著增大水文连通性和泥沙输移^[14]。

3 坡面水文连通性的影响因素

影响坡面水文连通性的因素包括气候、地形地貌、土壤、生物、人类活动等,这些因素之间又会相互作用,对坡面水文连通性产生综合影响。比如:气候决定降雨多少,也影响植被、土壤性质等,从根本上影响水文连通性;地形坡度影响汇流速度进而影响坡面水文连通性;植被类型和盖度也会对降雨和土壤的理化性质产生影响;坡度、雨强和地表糙度对坡面水文连通性具有重要影响。

3.1 降雨

气候决定降雨,降雨量、降雨强度和频率是影响坡面水文连通性的重要因素。降雨量大或降雨强度高,表层土壤更容易蓄满产流或超渗产流,有利于坡面水文连通性的发展;降雨量小或降雨强度小,大部分降雨入渗土壤,则不利于坡面水文连通性的发展^[15]。姚安坤等^[16]通过模拟降雨试验,发现相同坡度下,径流系数与降雨强度呈线性正相关关系,说明降雨强度越大,坡面水文连通性越强。降雨频率的增加也会引起坡面水文连通性的增强,频繁的降雨会造成土壤含水量高、湿度大,进而减少下渗,增加坡面径流,增强坡面水文连通性。降雨溅蚀作用也可以改变土壤结构,促进土壤团粒及团聚体分散成更小的颗粒,从而影响水文连通性^[17-18]。

3.2 地形地貌

地形地貌是影响水文连通性的又一重要因素,水文连通性在山丘区的时空变化十分强烈,山坡的结构对水文连通性有非常显著的影响^[19]。董艳等^[20]在黄土坡耕地开展降雨试验,发现坡度是影响坡面水文连通性的主要因素,径流长度随坡度的增大而增大,说明坡度增大有利于坡面水文连通性的发展;曹梓豪等^[21]表明坡长越长,坡度的作用越明显,水文连通性在各坡度间的差异越显著,坡面与沟谷、河道相连也可以增加连通性。

3.3 土壤

土壤类型会影响水文连通性^[22],比如沙质土壤的透水性远高于黏性土壤,相同的降雨和坡度条件下,土壤透水性越差,坡面水文连通性越强;而土壤透水性强就会有更多水分渗入土壤,不利于坡面水文连通性的发展。土壤厚度不同,储存水的能力不同,在蓄满产流区,坡面水文连通性会随土壤厚度的增加而减小^[2]。土壤含水量也是影响坡面水文连通性的重要因素,前期土壤水分越高则越容易产流,从而有利于水文连通性的发展^[2]。土壤性质如土壤粒度、孔隙度等会显著影响坡面水文连通性^[23],土质疏松、孔隙度高以及大孔隙会增加土壤的通气性,提高降雨的下渗速度,从而减小了坡面水文连通性;反之,土壤质地紧实的坡面会有较强的水文连通性^[24-25]。

3.4 植被

植被覆盖对坡面水文连通性也起着重要作用,因为它对连通性既有增强作用也有限制作用^[26]。植被会减缓雨滴对地表的打击,植物凋落物能够截留降雨并消减降雨动能,提高土壤的入渗能力^[27],植物根系改变了土壤结构,增加了地表径流的入渗能力^[28-29],导致坡面水文连通性下降。吴钦孝等^[30]研究表明枯枝落叶层既能截留降雨形成的径流,也能改变土壤性质,防止溅蚀,从而减小坡面水文连通性。植物根系一方面通过缠绕固结作用强化土壤抵抗侵蚀的能力,另一方面穿插土壤,形成孔隙来影响水文连通性;植被茎秆会降低坡面水流流速,从而降低地表水文连通性^[31]。此外,植被类型、生长状况、演替阶段等对坡面水文连通性均有不同程度的影响,植被类型越多、生长状况越好、演替阶段越高级,抑制水文连通性的能力越强^[32-33]。

植被覆盖率对水文连通性影响的研究成果较多且认识较为一致,植被格局对水文连通性的影响是当前研究的热点和难点。马勇等^[34]发现草带布设位置不同对坡面水文连通性的影响存在差异,坡中、坡上布设草带的坡面水文连通性较好,有利于径流的产生;曹梓豪等^[35]通过最优植被格局试验表明径流长度与植被盖度呈负相关,但当盖度达到45%时,水文连通性差异较小。

3.5 人类活动

人类活动对坡面水文连通性既有限制作用也有增强作用,人类活动往往通过改变坡面微地形、土壤特征、植被覆盖等影响坡面水文连通性。翻耕会使表层土壤更加松散,提高土壤透水性,减弱坡面水文连通性^[36]。坡面治理工程例如修建梯田、种草造林等措施,

能够截短坡面长度、减小水流速度,显著降低坡面水文连通性^[12]。随着农事活动频次和扰动强度的增大,坡耕地保水性变差,坡面水文连通性增强^[37]。梯田缺乏维护甚至弃耕,护边田埂被雨水冲毁,可显著提高水文连通性^[38]。某些人类活动也可能潜在改变坡面的水文连通性,比如坡耕地建设道路、农耕机械压实土壤等,会降低土壤的入渗能力,降雨后更容易形成坡面径流^[39-40]。森林植被砍伐会导致坡面土地裸露,植被对降雨的阻挡能力减弱,导致地表径流的增加^[12],会增强坡面水文连通性。

4 坡面水文连通性的定量表征

4.1 径流流路长度

径流流路长度指沿着流动方向,从特定地点到流动方向终点的最大地面距离在水平面的投影长^[41],也称汇流路径长度或径流长度。在所有其他外在条件一样的情况下,径流流出的长度越长,流速越快,水文连通性越强。董艳^[20]等在黄土高原进行黄土坡微地形实验,发现径流长度的栅格数占比能够表达径流源区的形成。

径流流路长度可以直观地表征坡面的水文连通性,但是,这种方法在坡面上应用时需要高精度的DEM,如果构建的DEM数据精度不够,会影响实验结果的精确性。

4.2 染色剂示踪法

染色剂示踪法运用染色剂追踪土壤中水流的流向和深度,广泛应用于研究土壤优先流特征,也可用于水文连通性研究。杨大明等^[42]运用染色剂示踪法对坡面水流进行研究发现,坡面流速主要受流量影响;吴庆华等^[43]认为一定程度上,染色深度越大,则其优先流程度越高,也就是坡面水文垂直连通性越强;DAI等^[44]通过染色剂示踪实验提出土壤中的水文屏障会阻碍水分的下渗,降低垂直水文连通性,增强水平水文连通性。

染色剂示踪法具有操作简单、成本低、适用性强等优点,是追踪土壤内部水分渗流路径最直接且采用最广泛的方法^[45-46],可很好地揭示坡面水文连通性。但染色剂示踪法也存在不确定性,例如人为操作的误差和染色剂的扩散现象,会降低实验结果的精度,同时测定坡面流速时得到的一般是坡面表层的最大流速而非平均流速^[47-48]。

4.3 连通性指数

连通性指数是 BORSELLI^[49]提出的, LÓPEZ-VICENTE^[50]等在西班牙比利牛斯山运用连通性指数计

算了水文连通性,结果表明随着弃耕地植被的恢复,连通性降低。其表达式为:

$$IC_m = \log_{10} \left(\frac{D_{up,m}}{D_{dn,m}} \right) \quad (1)$$

$$D_{up \cdot m} = W_m \times S_m \times \sqrt{A_m} \quad (2)$$

$$D_{dn \cdot m} = \sum_{i=m} \frac{d_i}{W_i \times S_i} \quad (3)$$

式中: IC_m 为连通性指数, IC_m 越大则连通性越强, IC_m 越小则连通性越弱; D_{up} 和 D_{dn} 分别表示上坡和下坡部分的连通性; A_m 为上坡作用面积; S_m 为上坡作用面积的平均坡度; W_m 为与土地利用类型相关的系数; d_i 为第 i 个栅格到底部的距离; W_i 为第 i 个栅格的土地利用类型相关的系数, S_i 为第 i 个栅格的坡度。

连通性指数考虑的因素比较全面,发展也比较成熟,广泛应用于水文和泥沙连通性研究。但是,连通性指数直接反映了结构连通性,对于功能连通性的表征尚有不足。

4.4 相对地表连通函数

将地表连接到整个坡面面积的比值作为研究区地表储水量/地表最大储水量 (DS/DS_{max}) 的函数称之为相对地表连接函数^[13,16,51],它表示坡面微地形对径流的影响,可以作为地表功能连通性的指标。入渗量和地表储水量计算公式为:

$$R = \left(1 - \frac{i}{p}\right) f\left(\frac{P-I}{DS}\right) \quad (4)$$

$$i = \frac{S}{2\sqrt{t}} + K_p \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\theta_s \pi K_s (1-s) \frac{2b+3}{b+3}} \quad (6)$$

式中: R 为径流系数; i 为入渗率, mm/s; p 为降雨强度, mm/h; P 为累积降雨量, mm³; I 为累积入渗量, mm³; DS 为地表储水量, mm³; S 为吸水率, mm/s^{1/2}; K_p 为导水率, mm/s; K_s 为饱和导水率, mm/s; s 为相对饱和度, 土壤含水量与饱和土壤含水量的比值, 即 θ/θ_s ; b 为土壤孔隙分布数。

相对地表连接函数能够较好的反应坡面的功能连通性,但表征结构连通性的能力较差,所以需要借助其他表征结构连通性的方法来辅助研究水文连通性。

4.5 地形湿度指数

地形湿度指数大^[52-53],说明该坡面上的汇流面积大,或者坡面的水力坡降较低,土壤更容易达到饱和而产生流。地形湿度指数的计算见式(7)。

$$TWI = \ln(\frac{\alpha}{\tan\beta})$$

(7)

式中:式 α 表示流经地表 i 点的单位等高线长度上的汇流面积,单位 m^2/m ,即上坡面积; β 为该点处坡度,单位 $^\circ$ 。

地形湿润指数用于表征结构连通性,主要考虑坡面汇流面积和坡度等因素,应用比较简便,但忽略了植被、微地形和土地利用类型等对水文连通性的影响,因而同样需要借助其他表征方式弥补其不足。

4.6 方向性渗透指数

方向性渗透指数是基于景观留滞水土功能、覆被和地形属性及物质运动方向等基础上建立的,LUDWIG等通过方向渗透性指数在澳大利亚牧场测算了平缓、倾斜不同坡面水土资源的保留能力^[54]。计算公式如下:

$$DLI = 1 - (\frac{L_{\max} - L_{\text{obs}}}{L_{\max} - L_{\min}})^k$$

(8)

$$L_{\text{obs}} = \sum_j \left[\left(\frac{h_s}{h_f} \right) \left(\sum_i dp_{i,j}^2 \right) + \left(\left(\frac{h_s}{h_f} \right) - 1 \right) \left(dt_j + db_j \right)^2 + \left(dt_j^2 + db_j^2 \right) \right] \left(w_s / w_m \right) dp$$

(9)

式中: L_{obs} 为沿水流方向由逐步累积汇流算法计算的渗透值; L_{\min} 和 L_{\max} 分别为最小(植被覆盖度为100%时的 L_{obs})和最大渗透值(植被覆盖度为0时的 L_{obs}); h_s 和 w_s 分别为标准小区的长与宽; h_f 和 w_m 分别为实际小区的

长与宽; dt 和 db 分别为第一个景观斑块与小区坡顶和坡底的距离; dp 为景观斑块之间的距离。

方向渗透性指数能够很好地表征不同植被覆盖度下的水文连通性。缺点是当研究小区斑块增多时,方向性渗透指数计算量会随斑块量而变大。

5 不足和展望

(1)坡面水文连通性研究的代表性区域仍不充分。目前在黄土高原等典型区对坡面水文连通性的研究较多,需关注其他代表性区域的研究,如科学问题复杂独特的西南喀斯特地区等。喀斯特地区独特地表地下二元结构使得土壤层和表层岩溶带坡面水文连通性难于观测和定量描述,影响了对喀斯特坡面水文连通机制的深入认识。另外,喀斯特地区水土流失导致的石漠化问题对当地社会发展和生态环境也造成了严重影响,研究喀斯特地区坡面水文连通性可以为石漠化治理提供科学依据。

(2)不同坡面条件对水文连通性的影响机制尚不明确。不同条件坡面的水文连通性差异明显,即使同一区域内坡面水文连通性也会因坡面条件的不同而不同,进而影响侵蚀产沙过程,因而需进行全面研究不同坡面条件下一因素以及多因素的交互作用对水文连通性及侵蚀产沙的影响机制,从而在机理上解释侵蚀产沙的水文驱动机制。

表1 坡面水文连通性表征方式对比
Table 1 Indicators of hydrological connectivity on hillslope scale

表征方式	优缺点	适用范围	侧重因素
径流流路长度	优点:能根据实验直观地表征坡面的连通性。 缺点:需要高精度的DEM。	有微地形的小尺度坡面。	需要高精度的DEM需要对获取DEM的方法进行筛选,如果构建的DEM数据精度不够,会影响实验结果的精确性。
染色剂示踪法	优点:操作简单,成本低,适用性强,直观的体现出坡面径流的垂直、横向和纵向连通性。 缺点:人为操作误差和染色剂扩散现象会影响实验精度;测定结果为坡面表层最大流速而非平均流速。	可适用多种情况下的坡面水文连通性研究。	此方法适用性强,对于研究坡面垂直连通性更有价值。
连通性指数	优点:发展比较成熟,广泛应用于水文和泥沙连通性研究。 缺点:直接反映了结构连通性,对功能连通性的表征尚有不足。	大中小尺度坡面均可适用。	上下坡作用的面积、坡度、土地利用状况、距离等。
相对地表连接函数	能够较好的反应坡面的功能连通性,但表征结构连通性的能力较差。	有微地形的坡面。	降雨强度、累积降雨量、累积入渗量、地表储水量、饱和导水率,土壤孔隙分布数。
地形湿度指数	优点:用于表征结构连通性,应用简便。 缺点:在理想的坡面进行计算,考虑的因素少。	大中小尺度坡面均可适用。	坡面汇流面积和坡度。
方向性渗透指数	优点:能够很好地表征不同植被覆盖度下的水文连通性。 缺点:研究区斑块越多,计算量越大。	大中小尺度坡面均可适用。	植被覆盖度、研究区的长度和宽度、景观斑块之间的距离。

(3)坡面水文连通性定量表征方法体系还不完善。由于水文连通性受多种因素的综合影响,且概念有一定的抽象性,无法直接计算或者测量,目前多通过利用连通性指数间接表征,因现有指数计算中考虑的影响因素各自有所侧重,限制了对坡面水文连通机制的深入研究。为深入揭示坡面水文连通性的影响机制,同时也便于不同地区、不同条件坡面水文连通性的对比研究,需建立具有普遍适用性的坡面水文连通性定量表征的方法体系。

(4)土壤侵蚀与坡面水文连通性的关系尚不明确。土壤侵蚀与坡面水文连通性密不可分,径流侵蚀是坡面土壤侵蚀最重要的原因之一。一般来说,坡面土壤侵蚀和水文连通性呈正相关关系,连通性强则土壤侵蚀强度大,但随植被覆盖率的提高或者岩石裸露率的提高,坡面泥沙变少,即使坡面水文连通性变强,土壤侵蚀强度也会下降,所以坡面土壤侵蚀和连通性的关系在各种因素影响下变得十分复杂,未来的研究方向应设计多种实验来验证两者的具体关系。

参考文献:

- [1] WHYBURN G T. On the cyclic connectivity theorem[J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part C Comparative Pharmacology*, 1931, 69(2):185-90.
- [2] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2):295-308.
- [3] CLARK D. The formal and functional structure of wales[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2015, 63(1):71-84.
- [4] BONHAM L C. Migration of Hydrocarbons in Compacting Basins [J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64:549-567.
- [5] SASKIA K, PEDRO N J, PATRICIA S, et al. The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics?[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 664:1557-1572.
- [6] BAARTMAN J, NUNES J P, MASSELINK R, et al. What do models tell us about water and sediment connectivity?[J]. *Geomorphology*, 2020.
- [7] BRACKEN L J, CROKE J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 21(13).
- [8] CONTE P, FERRO V. Measuring hydrological connectivity inside a soil by low field nuclear magnetic resonance relaxometry[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(1):93-101.
- [9] PHILLIPS J. Hydrological connectivity of abandoned channel water bodies on a coastal plain river[J]. *River Research and Applications*, 2013, 29(2):149-160.
- [10] GRILL G, Lehner B, Lumsdon A E, et al. Reply to Comment on 'An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales'[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(3).
- [11] 景可, 师长兴. 流域输沙模数与流域面积关系研究[J]. *泥沙研究*, 2007(1):17-23.
- [12] LLENA M, VERICAT D, CAVALLI M, et al. The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 660:899-912.
- [13] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5):1-13.
- [14] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3):586-594.
- [15] 王盛萍, 姚安坤, 赵小婵. 基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4):526-533.
- [16] 姚安坤. 基于降雨模拟试验的坡面水文连通性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [17] 胡伟, 郑粉莉, 边锋. 降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(15):4708-4717.
- [18] 殷水清, 王文婷. 土壤侵蚀研究中降雨过程随机模拟综述[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(10):1747-1757.
- [19] 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 等. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1):112-122.
- [20] 董艳. 黄土坡耕地微地形地表水文连通性特征研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2018.
- [21] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 黄河下游河岸坡面产流产沙特征及其与汇流路径长度关系[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6):1389-1400.
- [22] NANDA A, SEN S, MCNAMARA J P. How spatiotemporal variation of soil moisture can explain hydrological connectivity of infiltration-excess dominated hillslope: Observations from lesser Himalayan landscape[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579:124-146.
- [23] ZHANG G H, LIU G B, TANG K M, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2008, 51(3):883-890.
- [24] 程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构定量化研究进展[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4):988-994.
- [25] 吕海深, 崔逸凡, 朱永华. 大孔隙对径流过程影响的研究进展[J]. *水文*, 2020, 40(1):13-17.
- [26] STAVI I, Rachmilevitch S. Small-scale geodiversity regulates functioning, connectivity, and productivity of shrubby, semi-arid rangelands[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29:205-209.
- [27] CERDÀ A. Parent Material and Vegetation Affect Soil Erosion in Eastern Spain[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(2):362-368.
- [28] DAI L, ZHANG Y, LIU Y, et al. Thick roots and less microaggregates improve hydrological connectivity[J]. *Chemosphere*, 2020, 266(1-2):129008.
- [29] 易婷, 张光辉, 王兵, 等. 退耕草地近地表层特征对坡面流速的影响[J]. *山地学报*, 2015(4):434-440.
- [30] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土

- 的作用评价[J]. 水土保持学报, 1998(2): 24-29.
- [31] ZHAO C, GAO J E, HUANG Y, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges[J]. Land Degradation and Development, 2015, 27(3): 748-757.
- [32] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [33] CAMMERAAT L H, WILLOTT S J, COMPTON S G, et al. The effects of ants' nests on the physical, chemical and hydrological properties of a rangeland soil in semi-arid Spain[J]. Geoderma, 2001, 105(1): 1-20.
- [34] 马勇勇, 李占斌, 任宗萍, 等. 草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 170-176.
- [35] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 基于坡面水文连通性的黄河下游河岸缓冲带植被格局优化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 739-747.
- [36] 王发, 付智勇, 陈洪松, 等. 喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 111-116.
- [37] ZHANG G H, TANG M K, ZHANG X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34: 1302-1309.
- [38] CALSAMIGLIA A, LUCAS-BORJA M, FORTESA J, et al. Changes in soil quality and hydrological connectivity caused by the abandonment of terraces in a Mediterranean burned catchment[J]. Forests, 2017, 8: 333.
- [39] CAO L, ZHANG K, DAI H, et al. Modeling interrill erosion on unpaved roads in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(8): 825-832.
- [40] 朱晨春, 陈晓宏, 杨杰等. 西北江三角洲河道纵向连通性变化及其成因分析[J]. 水文, 2020, 40(6): 68-74.
- [41] MAYOR Á G, BAUTISTA S, SMALL E E, et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands[J]. Water Resources Research, 2008, 44(10): 2183-2188.
- [42] 杨大明, 高佩玲, 刘小媛, 等. 坡面薄层水流流速研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 72-80.
- [43] 吴庆华, 张家发, 蒯文静, 等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 82-90.
- [44] DAI L, ZHANG Y, LIU Y, et al. Assessing hydrological connectivity of wetlands by dye-tracing experiment[J]. Ecological Indicators, 2020, 119.
- [45] ZHANG G H, LUO R T, YING C, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1-2): 205-213.
- [46] KRAMERS G, RICHARDS K G, HOLDEN N M. Assessing the potential for the occurrence and character of preferential flow in three Irish grassland soils using imageanalysis[J]. Geoderma, 2009, 153(3-4): 362-371.
- [47] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 567-574.
- [48] 罗榕婷, 张光辉, 沈瑞昌, 等. 染色法测量坡面流速的最佳测流区长度研究[J]. 水文, 2010, 30(3): 5-9.
- [49] BORSELLI L, CASSI P, TORRI D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. Catena, 2008, 75(3): 268-277.
- [50] LÓPEZ-VICENTE M, POESEN J, NAVAS A, et al. Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees[J]. Catena, 2013(102): 62-73.
- [51] 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[J]. Catena, 2017, 157: 90-111.
- [52] WILLEMIJN M A, PATRICK W B, SJOERD E Z. Influence of spatial variations of microtopography and infiltration on surface runoff and field scale hydrological connectivity[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(2): 303-313.
- [53] JANCEWICZ K, MIGON P, KASPRZAK M. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index[J]. Science of the Total Environment, 2019, 656(MAR.15): 1046-1062.
- [54] LUDWIG J A, EAGER R W, LIEDLOFF A C, et al. A new landscape leakiness index based on remotely sensed ground-cover data[J]. Ecological Indicators, 2006, 6(2): 327-336.

Research Progress of Slope Hydrological Connectivity Based on Soil Erosion

CHEN Liang¹, HU Yanxia¹, LI Zhenwei^{2,3}, XU Xianli^{2,3}, YU Xingxiu¹

(1. Faculty of Resources and Environment Science Hubei University, Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, Wuhan 430062, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China)

Abstract: Quantitative indicators of slope hydrological connectivity mainly include runoff channel length, staining tracer method, connectivity index, relative surface connectivity function, topographic humidity index, directional permeability index, etc. According to the comprehensive analysis, the future research of hydrological connectivity should focus on the following aspects: (1) strengthen the comparative study of hydrological connectivity of slope in different regions; (2) Define the influence mechanism of different slope conditions on hydrological connectivity; (3) Establish the quantitative characterization method system of slope hydrological connectivity; (4) Analyze the relationship between soil erosion and slope hydrological connectivity.

Keywords: soil erosion; slope surface; hydrology connectivity; connectivity index