

# 流域侵蚀输沙空间尺度效应及其影响因素研究进展

潘雅文<sup>1,2</sup>, 马文龙<sup>1</sup>, 潘庆宾<sup>3</sup>, 韩剑桥<sup>2,4</sup>, 张胜男<sup>5</sup>

(1.河南黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003;

2.西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 3.中国水利水电科学研究院国际泥沙研究培训中心, 北京 100048;

4.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.中规院(北京)规划设计有限公司, 北京 100044)

**摘 要:**侵蚀输沙空间变异及其尺度效应是流域水文过程研究的一个重要内容,对流域水土流失控制和水沙资源科学管理具有重要意义。通过对流域侵蚀输沙空间尺度效应研究成果的系统回顾,从坡面到流域,阐述了降雨、土壤和植被等环境要素对侵蚀输沙尺度效应的影响,梳理了尺度效应产生机制方面的认知,总结了不同条件下坡面产流和侵蚀输沙尺度转换的代表性方法。在此基础上,对流域侵蚀输沙空间尺度效应研究的发展趋势进行了讨论,未来应增加新技术和数据的应用,建立具有明确物理机制的侵蚀输沙空间尺度转换方法,同时,急需突破剧烈环境变化对空间尺度效应影响的研究。本文的梳理与总结可为流域侵蚀输沙过程的深入研究提供参考,为土壤侵蚀防治和河流水沙的综合管理提供一定的科学支持。

**关键词:**流域; 空间尺度效应; 产汇流; 土壤侵蚀; 泥沙输移

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0088-10

## Review of the Scale Effects of Soil Erosion and Sediment Delivery and Their Influencing Factors

PAN Yawen<sup>1,2</sup>, MA Wenlong<sup>1</sup>, PAN Qingbin<sup>3</sup>, HAN Jianqiao<sup>2,4</sup>, ZHANG Shengnan<sup>5</sup>

(1.Henan Yellow River Engineering and Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China;

2.Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.International Research and Training

Center on Erosion and Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research,

Beijing 100048, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of

Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China; 5.CAUPD Beijing Planning & Design Ltd, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Study of the spatial variations and scale effects of soil erosion and sediment delivery is critical for fully understanding watershed hydrological processes and sustainable watershed management. We reviewed published literatures and existed knowledge relating scale effects of soil erosion and sediment delivery, described the effects of spatial heterogeneity of environmental factors, including geology, climate, vegetation, and human activities on the scale effects of sediment yield, and summarized representative conclusions and the corresponding transformation functions for describing the scale effects of runoff generation and soil erosion on hillslopes. Finally, we proposed that future studies should pay more attention to the disturbance of scale effects caused by human activities and to the establishment of physically-based scaling functions. This review will provide information for further study of the soil erosion and sediment delivery processes, and support the planning of soil conservation measures and watershed management projects at different scales.

**Keywords:** catchment; spatial scale effects; runoff generation; soil erosion; sediment delivery

流域侵蚀输沙是水文现象中与人类生存最密切相关的过程之一,与耕地退化、水体污染和洪涝灾害等环境问题密切相关。侵蚀输沙过程容易受到气候、

地形、地貌、土壤和植被等空间异质环境要素的影响,土壤侵蚀空间分异和流域输沙过程的尺度依存关系客观存在。以人类活动为代表的强烈环境变化干扰

收稿日期:2021-04-08

修回日期:2021-05-18

资助项目:国家自然科学基金(41807067);中国科协青年人才托举工程项目(2019-2021QNRC001);陕西省水利水保项目(2017sbkj-01)

第一作者:潘雅文(1992—),女,河南郑州人,硕士,工程师,主要从事流域水文泥沙、水生态等方面的研究。E-mail:pywpyw111@163.com

通信作者:韩剑桥(1987—),男,河南禹州人,博士,副研究员,主要从事水沙灾害与环境方面的研究。E-mail:hjq13@163.com

了土壤侵蚀空间分布和水文泥沙的连通与输移特征,增强了流域侵蚀输沙的空间异质程度,使得侵蚀输沙过程的空间尺度特征更加复杂。流域侵蚀输沙空间尺度效应的研究有助于全面认识流域水文循环和侵蚀输沙过程,对水沙演变的定量解析和水沙预报具有重要作用<sup>[1-3]</sup>,是现阶段水沙科学研究中的一个前沿与热点问题。水文现象的空间尺度问题由来已久,随着观测和模拟手段的进步和地球系统科学研究的需要,水文尺度效应和尺度转换从 20 世纪 90 年代迅速得到重视<sup>[4-5]</sup>。伴随水文过程尺度效应研究的兴起,流域侵蚀输沙过程的空间尺度效应也展开了大量的研究,并在侵蚀过程空间异质性和流域输沙尺度效应等方面取得了一定的成果。本文从坡面到流域,系统梳理侵蚀输沙尺度效应对环境要素响应的研究成果,分析流域侵蚀输沙过程空间尺度效应产生机制的认知,总结坡面产流和侵蚀输沙尺度转换的代表性方法,对流域侵蚀输沙空间尺度效应研究的发展趋势进行讨论,并提出今后研究的方向与设想。

# 1 坡面产流的尺度效应及影响因素

## 1.1 坡面产流尺度效应

坡面产流的坡长效应是其尺度效应最重要的体现。坡面面积和承雨量随坡长增加,坡面产流总量随坡长而增加。付兴涛等<sup>[6]</sup>发现大雨强条件下径流随坡长增加的效应更显著,二者间可用线性关系表述,王奇花等<sup>[7]</sup>也有相似的结论。相较于产流量,径流深综合考虑了坡面面积差异,能更有效地反映坡面产流强度的变化特征,径流系数进一步考虑了雨强差异,能更科学地反映坡面产流能力。关于坡面径流深和径流系数尺度效应的研究存有一定争论。坡面径流

深随坡长的增加的规律变化较为复杂,有研究认为<sup>[8]</sup>,坡面径流深随坡长的增加而增加,当坡长大于 80 cm 时,径流深增幅变缓;Asadzadeh 等发现<sup>[9]</sup>,径流深随坡长的增加而降低,当坡长达到 10 m 以上时,径流深随坡长的变化不再显著。关于径流系数的尺度效应研究方面,有研究发现<sup>[10]</sup>,随着坡长增加,径流系数先增加后减小,坡面长度在 15 m 左右时径流系数最大;Chen 等<sup>[11]</sup>发现,坡面径流系数随坡长的增加而减小,当坡面空间尺度小于 10 倍的元面积时,径流系数的减小更明显;有研究认为<sup>[12]</sup>,随坡长的增加,径流系数出现增加—减小—增加或周期性的变化特征。表 1 列出了坡面径流深和径流系数坡长效应的典型研究及数学表达,大量研究认为径流深和径流系数随坡长的增加而减小<sup>[13-15]</sup>,少数研究发现坡面径流深随坡长增加而增加<sup>[8]</sup>。坡面径流深随坡长变化趋势的差异可能与具体试验条件有关,认为径流深随坡长增加而增加的相关论文<sup>[8,16-17]</sup>,多以人工模拟降雨的形式进行,并且试验小区无覆盖。在裸露坡面和大强度降雨组合条件下,坡面径流更易携带细颗粒泥沙充填下坡向土壤表层孔隙,造成土壤入渗能力的降低而增加坡面产流,最终造成坡面径流深随坡长而增加的现象<sup>[17]</sup>。总体而言,尺度转换方程在不同的边界条件下并非固定的,转换方程参数也会受降雨条件、土壤入渗和坡面特征等外界因素的影响<sup>[18-19]</sup>。目前关于坡面产流尺度转换方程的研究多基于试验观测,以回归分析的方法建立产流参数与坡长的数学关系。由于样本数量有限,不同形式方程容易产生较接近的拟合优度。因此,在今后的研究中应加强不同条件下产流能力随坡长变化的机理性认识,以期从理论上解析坡面产流尺度效应的形成原因。

表 1 坡面径流深和径流系数尺度效应的典型研究结论与转换方程

研究结论	转换方程	坡长范围	试验条件描述
径流深随坡长增加 对数方程 <sup>[8]</sup>	$R=a\times\ln(L)+b$ 参数 $a, b$ 随降雨强度而变化	0.4~2.0 m	模拟降雨 黄绵土裸坡 坡度 20°
径流深随坡长减小 <sup>[20]</sup> 对数方程	$R=-0.394\times\ln(L)+1.77$ (黏土) $R=-0.311\times\ln(L)+1.17$ (壤土)	2~40 m	自然降雨 混交落叶林 坡度 30°
径流深随坡长增加而减小 <sup>[13]</sup> 幂函数	$R=m\times L^n$ $m(113\sim174), n(-1.38\sim0.08)$	1~15 m	煤矿迹地 草地覆盖 坡度 20°
径流深随坡长增加而减小 <sup>[3]</sup> 幂函数	$R=167.12\times L^{-0.64}$ (丰水年) $R=11.07\times L^{-0.73}$ (枯水年)	1~16 m	自然降雨 农业用地 坡度 5%

## 1.2 坡面产流尺度效应影响因素

地表产流决定于降雨和土壤入渗的平衡,降雨强

度<sup>[6,21-22]</sup>、雨型<sup>[23]</sup>和降雨时长<sup>[18,24]</sup>等降雨特征会影响坡面流汇集而影响产流的尺度效应。王秀颖等模拟降

雨结果表明<sup>[22]</sup>,小雨强条件下坡面产流的坡长效应更强,大雨强条件下坡长效应减弱。刘海燕等发现<sup>[23]</sup>,在黄土高原地区,短历时强降水条件下,坡面径流系数随坡长先增加后减小,长历时弱降水条件下,径流系数随坡长的增加而增加。Wu 等<sup>[18]</sup>研究发现,随降雨时长的延长,土壤入渗能力降低,坡面产流的尺度效应减弱。坡面特性与植被覆盖类型也对产流的坡长效应产生影响。土壤饱和导水率存在较强的空间变异性,坡面尺寸的增大会增加入渗点出现的可能性,从而造成坡面越大相对入渗量越大的现象<sup>[25]</sup>。Meghdad 研究发现<sup>[20]</sup>,与壤土相比,黏土坡面产流的尺度效应更强。植被覆盖影响坡面入渗,从而影响产流的尺度效应。付兴涛的试验结果表明<sup>[16]</sup>,裸露坡面和坡耕地的坡面径流深随坡长的增加而增加,经济林坡面径流深则随坡面的增长而减小。Mariano 发现<sup>[13]</sup>,在不同植被盖度条件下,坡面产流都随坡长的增加而减小,随着植被盖度的增加,坡面产流随坡长减小的幅度减弱,Mounirou 等<sup>[26]</sup>研究也发现退化程度严重的坡面,产流的尺度效应更强烈。人类活动和自然灾害的干扰也会对面产流的尺度效应造成影响,如 Langhans 的研究表明<sup>[27]</sup>,少耕条件下农田坡面产流的尺度效应可比正常翻耕条件下强 15%。Kasraie<sup>[28]</sup>在澳大利亚火烧迹地的观测表明,火后坡面产流尺度效应增强,大孔隙流是造成火后迹地坡面产流尺度效应的最重要因素;Prats 等发现<sup>[29]</sup>,火灾后不同恢复年限条件下,坡面产流的尺度效应不同,火后土壤斥水性和持水能力的改变是造成产流尺度效应的主要原因。总结而言,坡面产流尺度效应受到降雨、土壤、地表覆盖和外界干扰等多环境要素的影响,未来研究应加强多要素组合条件下的尺度效应试验与观测,增加对外界环境干扰条件下尺度效应变化成因的解释,以进一步支持产流尺度效应的机制研究。

## 2 坡面侵蚀过程的尺度效应

### 2.1 坡面侵蚀尺度效应

与产流类似,坡长效应是坡面侵蚀过程空间尺度效应的最主要体现<sup>[30]</sup>。关于坡面侵蚀强度对坡长增加的响应特征方面,目前已经开展大量的研究,但尚无确定的研究结论。有研究认为土壤侵蚀强度随坡长的增加而降低<sup>[31-34]</sup>,如,Yair 等研究发现<sup>[34]</sup>,在干旱地区土壤侵蚀强度随坡长的增加而降低,将其归因于不同坡长坡面径流汇集难易程度的不同。多数研究发现坡面侵蚀强度随坡长增加表现为先增加后基本稳定或减少的特征。如,Parsons<sup>[32]</sup>采用 2~27.78 m 的试验小区研究发现,产沙量先随坡长的增加而增

加,后剧烈减少,7 m 坡长对应最大的产沙量,Ghahramani 等<sup>[35]</sup>在森林覆盖坡面也取得了相似结论,发现坡长在 10 m 以下时侵蚀强度随坡长的增加而增加,并认为枯枝落叶层在坡面下部的累积造成泥沙的沉积,从而减轻坡面下部的侵蚀。蔡强国等<sup>[36]</sup>在黄土高原子洲地区 20~60 m 坡长的小区监测结果表明,土壤侵蚀强度随坡长的增加有先增强后基本稳定的趋势,坡长在 20 m 左右达到最大的侵蚀产沙强度。Koomson 等<sup>[37]</sup>在肯尼亚地区 20~84 m 农田小区的观测发现,农地土壤流失随坡长增加而增加,土壤侵蚀急剧增加的临界坡长大致在 50 m 左右。郑粉莉和唐克丽<sup>[38]</sup>发现,坡耕地侵蚀量随坡长的增加强弱波动交替,整体无规律性变化。综合上述,目前关于侵蚀强度随坡长增加的变化趋势方面尚无定论,但多数的研究认为坡面侵蚀强度随坡长增加表现出先增加后基本稳定或减少的特征。

表 2 列出了部分典型研究中关于土壤侵蚀强度坡长效应的数学表达,然而所列研究的坡长范围有限,难以完整反映侵蚀强度随坡长的非单调变化特征,此外,表中二者之间数学关系的建立也多是经验性的回归关系,不同的学者给出线性函数、幂函数和指数函数等不同形式。侵蚀强度随坡长增加变化趋势的不同主要由侵蚀尺度效应的产生机制所决定,与侵蚀产沙和输沙能力的平衡密切相关,目前关于该方面的研究也有不同假说。Bagio 等<sup>[39]</sup>认为坡长越长,承雨面积越大,径流量和流速增加,共同增强了径流的侵蚀和输移能力。陈永宗和景可等<sup>[40]</sup>总结认为关于侵蚀的坡长效应大致有 3 种观点:一是认为随坡长增加,坡面径流含沙量不断增加,水流能量更多消耗于泥沙搬运,侵蚀减弱;二是,随坡长增加,坡面流水深增加,坡面流造成的侵蚀量也相应增加,坡长与侵蚀量间呈指数关系;三是,随坡面向下水量的增加,侵蚀加剧,径流含沙量增加,水体能量主要为泥沙负荷消耗,侵蚀又减弱,二者相互消长,造成侵蚀从上坡向下坡基本保持不变。张乐涛和李占斌<sup>[41]</sup>分析了岔巴沟不同大小径流小区的产沙后认为,坡面系统侵蚀输沙模数和径流泥沙含量均表现出随空间尺度增加而增大的趋势,坡面系统不同尺度间输沙量的差异主要取决于径流总量的变化。坡面侵蚀的坡长效应也可能归结为侵蚀地貌形态演变和侵蚀链的形成。在多侵蚀力和抗蚀力的相互作用下,坡面侵蚀地形不断演化,彼此关联、有序排列形成链状结构,在坡面不同部位对应侵蚀地貌的不同发展阶段,链内细沟、浅沟和切沟之间的水动力侵蚀机制也不同<sup>[42-43]</sup>,不同坡长条件下,侵蚀地形发育形态和侵蚀剧烈程度的差异而造成侵蚀的坡长



效应。Parsons 等<sup>[44-45]</sup>提出,观测的产沙量是独立的颗粒经过一定距离传输的结果,表层的颗粒分布并不均匀,在颗粒传输与交换的过程中,大的土壤颗粒被二次搬运的可能性小于细颗粒,因此造成细颗粒不断替换大颗粒,造成细颗粒含量随坡长增加越来越多,侵蚀搬运的总沙量减少。然而,坡面土壤侵蚀不是单

纯的松散颗粒起动传输过程,土壤自身具有粘结特征,土粒的分散也会造成径流能量的耗散。因此,坡面侵蚀坡长效应的形成主要是径流侵蚀能力和搬运能力平衡的表现,如何综合从能量耗散的角度去解析坡面侵蚀过程与输沙过程对尺度效应的综合作用是土壤侵蚀坡长效应产生机制解析的关键。

表 2 坡面侵蚀强度尺度效应研究的典型结论与转换方程

研究结论	转换方程	坡长范围	试验条件描述
侵蚀强度随坡长减小 <sup>[13]</sup> 幂函数	$S = m \times L^n$ $m(1247 \sim 1839), n(-1.38 \sim 0.22)$	1~15 m	轻度退化煤矿迹地 坡度 20° 草地覆盖
侵蚀强度随坡长增加 <sup>[13]</sup> 线性方程	$S = 2672 + 39.13 \times L$	1~15 m	中度退化煤矿迹地 坡度 20° 草地覆盖
侵蚀强度随坡长增加 <sup>[13]</sup> 指数方程	$S = m \times e^{nL}$ $m(4907 \sim 5303), n(0.03 \sim 0.06)$	1~15 m	严重退化煤矿迹地 坡度 20° 草地覆盖
侵蚀强度随坡长而减小 <sup>[3]</sup> 幂函数	$S = 403.24 \times L^{-0.34}$ (丰水年) $S = 50.25 \times L^{-0.33}$ (枯水年)	1~16 m	自然降雨 农业用地 坡度 5° 模拟降雨
侵蚀强度随坡长而减小 <sup>[46]</sup> 指数方程	$S = 3.27 \times e^{0.38L}$	2.5~10 m	壤土裸坡 坡度 15°

2.2 坡面侵蚀尺度效应的影响因素

与产流相比,侵蚀过程更加复杂,所受影响因素更多,其尺度效应的刻画也更困难。坡面侵蚀的坡长效应受到降雨、坡度、土壤和植被等诸多环境因素的影响<sup>[47]</sup>。降雨特征如降雨强度<sup>[6,21]</sup>等都会影响坡面侵蚀的坡长效应;黎四龙等研究认为<sup>[21]</sup>,坡面总土壤流失量随坡长增加而增加,二者间为指数关系,雨强越大,指数项越大,也即土壤侵蚀的坡长效应越强。吴松柏的模拟结果表明<sup>[30]</sup>,沟间侵蚀随坡长的增加以指数形式减小,细沟侵蚀量则随坡长增加以指数形式增加,雨强越大,沟间侵蚀的尺度效应越弱,细沟侵蚀的尺度效应越强。Moreno 等<sup>[13]</sup>研究表明,植被退化程度的增强会改变坡面侵蚀的坡长效应,随着植被退化程度的增强,侵蚀强度与坡长间由负相关关系逐渐调整为正相关关系(表 2)。付兴涛<sup>[16]</sup>认为坡面植被覆盖的差别会造成侵蚀尺度效应的差异,在坡耕地和裸露坡面条件下,土壤侵蚀随坡长呈幂函数上升关系,经济林地条件下,土壤侵蚀随坡长增加则表现为指数上升关系。

3 流域径流汇集的尺度效应与水文模拟

3.1 流域径流汇集的尺度效应

流域地表径流不是坡面径流的简单线性叠加,在

欧洲的西北部,从小区到流域尺度,流域面积从 10<sup>-4</sup> hm<sup>2</sup>增加到 100 hm<sup>2</sup>,径流系数从 30%~50%降低到 0~5%<sup>[48]</sup>。在干旱和半干旱的以色列地区<sup>[49]</sup>,当研究面积从 10<sup>-4</sup> hm<sup>2</sup>增加到 2 hm<sup>2</sup>,径流系数从 30%~70%降低到 0%~20%,研究面积进一步增加到 12 hm<sup>2</sup>后,径流系数降低到 1%以下。目前研究多认为,流域径流系数随流域面积的增加而减小,气候、土壤、植被和地形等环境要素的空间异质性是造成流域产汇流尺度效应的主要原因<sup>[50]</sup>,各环境要素在流域内空间分布的差异造成不同尺度上产汇流主导环境要素发生变化,从而造成水文过程的空间差异<sup>[2,51]</sup>。随流域面积的增加,新水文过程的出现也是造成流域径流尺度效应的重要原因<sup>[48]</sup>,比如喀斯特洞穴排水效应、径流在沟道内的损失和地下径流的影响等<sup>[52-53]</sup>。汇水区域的水文连通性和降雨过程的时空异质性也是形成其尺度效应的重要原因<sup>[54-55]</sup>。

3.2 流域径流尺度效应与水文模拟

水量平衡模型是流域水文模拟的一种手段,这些模型的构建通常是基于小尺度产汇流机制的认知<sup>[56]</sup>,然而,坡面与流域尺度的水文过程存有一定的差异,当模型在不同尺度应用时,参数的选取与率定就可能表现出尺度依存性<sup>[57-58]</sup>。李彬权等<sup>[59]</sup>研究发现新安江模型空间敏感参数具有随空间尺度变化的

标度不变性,与流域集水面积之间的定量关系可建立相应的定量转换方程。Merz 等<sup>[57]</sup>验证了 HBV model 在澳大利亚 269 个面积从 10~130 000 km<sup>2</sup> 流域的表现,发现模型的有效系数随着流域尺度的增加而增加,模型各参数随流域尺度的增加没有明显变化;该研究认为流域面积越大,可用气象站点越多,观测站点的增加和气象数据代表性的提高增加了模拟的有效系数。分布式模型的应用为减弱流域水文模拟的空间尺度效应提供了一种新的方法,近年来在降雨、土壤入渗和下垫面空间异质性和水文过程的影响方面进行了大量的研究<sup>[60-62]</sup>,如,Cristiano 等<sup>[60,63]</sup>提出可以采用无因次参数表征降雨事件的空间分布及对水文模拟的影响程度,进一步减弱降雨输入空间异质性的影响,提升流域水文模拟精度。

与集总式模型相比,分布式模拟将流域划分为多个产汇流条件一致的基本单元,降低集总模拟的尺度效应。流域水文模拟还需考虑河流工程等对径流汇集传递的影响,在河道水文传输中可能发生汇流或耗损类型的变化,坡面与河道间径流的连通特性也是流域地表径流计算的一个核心问题<sup>[52,64-66]</sup>。此外,在分布式水文计算中,模型数学方程采用的原始观测一般是在 1~100 m 的小空间尺度,在这个范围内,许多要素的空间分异特征会被忽略,难以反映实际的水文过程<sup>[11, 67-68]</sup>。分布式水文模拟基本产流单元面积远大于采样面积,对尺度效应的忽略可能造成较大的计算误差。一些研究基于试验观测提出坡面产流尺度转换的公式,如 Chen 等<sup>[11]</sup>提出产流在尺度转化上遵循指数函数关系,其他的研究也多认为产流的空间尺度效应可用指数公式刻画,这类经验公式在一定程度上可用于产流预测<sup>[13,64]</sup>。尺度效应的研究本质是基于集总模拟的概念,分布式模拟在应用中降低了空间要素环境差异的影响。然而,分布式模型中仍有一些难以空间观测的变量或反映流域整体特征的变量,相应的参数通常只能在小尺度获取,尺度拓展的思想可应用于水文模拟中参数的估计。

## 4 流域泥沙输移过程的尺度效应

### 4.1 流域输沙尺度效应

从坡面到河道连续体系中,侵蚀和输沙过程随尺度的变化更加复杂<sup>[55]</sup>。在多数情况下,没有简单的关系可以描述流域内侵蚀—输沙的尺度依存特征<sup>[32,69]</sup>。从坡面到流域,侵蚀方式与侵蚀过程的发展造成泥沙产生与输移特征的变化,随流域面积的扩展,流域不同区位的作用逐渐从泥沙来源区,过渡为泥沙输运和沉积区。在小区尺度,泥沙主要产生于击

溅侵蚀、细沟侵蚀和沟间侵蚀,这些侵蚀方式的产沙量相对有限<sup>[70-71]</sup>。当从小区尺度扩展到流域尺度,更活跃的侵蚀方式出现并造成泥沙产输能力的增强,如沟道侵蚀和重力侵蚀导致产沙量的剧增<sup>[72]</sup>。Bartley 等<sup>[73]</sup>收集了澳大利亚 750 条河流的输沙数据发现,1~100 km<sup>2</sup> 是流域输沙尺度效应发生的主要空间,该尺度侵蚀沟的发育剧烈造成泥沙的剧增。Lane 等<sup>[74-75]</sup>研究不同尺度上产输沙过程的主控因素发现,坡面尺度( $10^{-6} \sim 10^{-2}$  km<sup>2</sup>)的泥沙输移主要受土壤剥离、植被覆盖和地形等因素限制,子流域尺度( $10^{-2} \sim 10$  km<sup>2</sup>)受沟道发育和泥沙输移沉积等因素限制,在流域尺度( $>10^2$  km<sup>2</sup>)以局部强降雨分布、能量耗散和挟沙力为主要限制因素。

关于流域输沙与流域面积的关系,不同地区研究结论不完全一致,传统观点认为,输沙模数随流域面积的增加呈减小的趋势,Chorley<sup>[76]</sup>在其《Geomorphology》一书中,将这种现象主要归因为:(1)小流域具有高侵蚀强度;(2)流域越小,整个流域被高强度降雨覆盖的可能性越大;(3)随着流域的增大,泥沙沉积于洪积平原的概率越大;(4)泥沙传递过程影响泥沙输移,缓坡处泥沙的沉积会降低整体坡度,增加淤积可能性。随着研究的深入,人们发现流域输沙的尺度效应受到地质、地貌、气候、植被和人类活动等因素的综合影响。闫云霞等<sup>[77]</sup>发现输沙强度具有随流域面积增加而减小、随流域面积增加基本保持不变和随流域面积增大而增大 3 种类型。Milliman 和 Sycitski<sup>[78]</sup>分析了全球 208 条河流输沙强度与流域面积关系,发现在不同的地貌区,输沙强度都随流域面积的增加而减小,高山区流域输沙的尺度效应最强,海岸平原区河流输沙的尺度效应最弱。Dedkov 和 Moszherin 收集了全球 3 700 个流域的研究发现<sup>[79]</sup>,流域输沙尺度效应与泥沙来源有关,河道侵蚀为主的区域,河流输沙强度随流域面积的增加而增加,坡面侵蚀为泥沙来源的地区,输沙强度随流域面积的增加而减小。De Vente 和 Poesen 认为<sup>[80]</sup>,泥沙侵蚀输移中的“源汇”过程演变是输沙尺度效应的主要成因,随着流域面积的增加,“源汇”过程由“源”大于“汇”逐渐转变为“源”小于“汇”,从而出现输沙强度先随流域面积的增加而增加,后随之减小的趋势。

### 4.2 黄河流域河流输沙的尺度效应

黄河是世界上侵蚀输沙最强烈的河流,许多学者对黄河输沙的空间尺度效应进行了研究,也取得了突出的成果。Xu 等<sup>[81]</sup>指出,无论是全流域还是局部尺度,黄河输沙尺度效应都与多数河流不同,随流域面积的增加,输沙逐步增加到一个峰值后逐渐稳定(图

1). 输沙强度与流域面积之间的关系整体呈现出非线性的过程,主要归因于:(1) 地表物质分布的不均匀性;(2) 流域在时空尺度上的自调整;(3) 流域尺度上的能量消散特征不同;(4) 径流功率随流域尺度增加不同。景可与师长兴<sup>[82]</sup>进一步指出,黄河中游流域输沙模数与面积的关系不受控于面积的大小,而取决于流域所在区域的地质构造单元的性质、地貌类型及土地利用特征等多个因素,最本质的是地貌类型和地质构造单元的活动性质等。颜明等<sup>[83-84]</sup>在泾河流域的两个支流的研究也在一定程度上支持这种观点。张晓明等认为<sup>[85-86]</sup>,流域输沙与控制面积间的关系取决于下垫面的复杂程度,流域环境要素相对一致时,河流输沙随面积发生趋势性变化,在黄河中游地区,地形地貌和植被覆盖等自然要素分布空间差异较大,流域输沙尺度效应的界定具有特定的“空间域”特征。黄河流域地形地貌复杂,一般情况下,河流输沙能力在山区大于丘陵区更大于平原区,河流在进入丘陵和平原以后,由于河型与水力边界条件的变化,流域输沙模数和流域面积的关系变化强烈<sup>[82]</sup>。当黄河由青铜峡进入河套平原以后,流域输沙模数降低,但流出河套平原进入丘陵山地以后,流域输沙模数随流域面积的增加而增加<sup>[82]</sup>。上述分析看出,目前关于流域输沙尺度效应的研究针对的流域面积多数在 100 km<sup>2</sup> 以上,在此尺度上,流域环境要素的空间异质性成为河流输沙尺度效应的主导成因,输沙模数与流域面积的关系不受控于流域面积大小。在实际侵蚀输沙过程中,小流域往往是侵蚀地貌形态演变和流域侵蚀-沉积过程最为剧烈的区域,其侵蚀输沙尺度效应也更强烈。同时,小流域也是水土保持措施布设的基本空间单元,在小流域上进行侵蚀—输沙空间尺度效应的研究将对黄土高原的治理提供有效的科学支撑<sup>[78,80-81]</sup>。

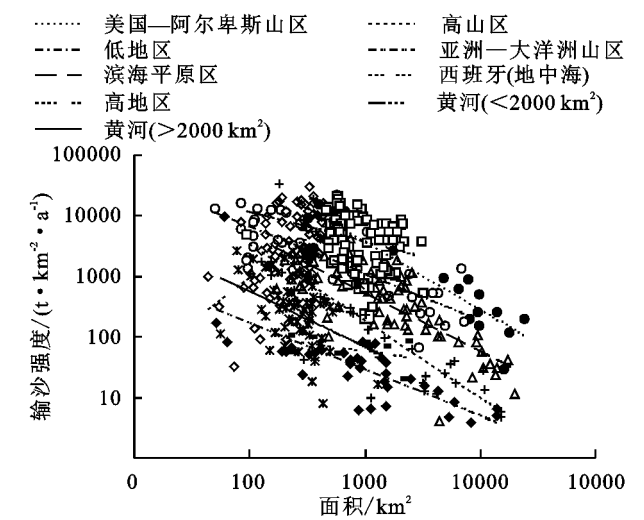


图 1 全球河流输沙空间尺度效应分析

### 4.3 尺度效应与流域侵蚀输沙预测

坡面土壤侵蚀预测是水土流失监测的基本单元,坡面尺度的研究成果是揭示土壤侵蚀动力机制的重要基础<sup>[87]</sup>。土壤流失计算模型对坡面侵蚀的尺度效应应有一定考虑,如在通用土壤流失方程(USLE)中,坡长的尺度效应以指数形式体现,指数项与坡度密切相关,刘宝元等<sup>[88]</sup>采用黄土高原的观测资料对其指数项进行修订。整体来看,目前在坡面侵蚀的尺度效应研究方面缺少动力机理解释,即便具有动力基础的 WEPP 模型对坡面尺度变化响应也不敏感<sup>[89]</sup>。转换方程是尺度扩展的一种有效方法,目前关于坡面侵蚀尺度扩展的相关研究多以试验观测为基础。由于控制试验中坡面坡长有限,限制了尺度转换方程的应用范围,因此,如何建立具有物理基础的坡面侵蚀尺度转换方程是尺度效应研究的一个重要方向。

## 5 存在问题与研究展望

流域侵蚀输沙空间尺度效应研究是全面解析流域水沙过程的基础,对水沙过程的预测预报和科学管理具有有重要意义。当前在坡面产流和侵蚀发生机制与影响因素方面已开展了大量的试验模拟和观测,流域侵蚀输沙空间尺度效应及其产生机制方面也有较全面的研究,并从输移动力过程的角度进行了一定的探索。随着近年来流域水沙过程管理需求的提升,关于侵蚀输沙空间尺度效应的研究需进一步加强,新的研究方法和技术的出现也为这些研究提供了机遇。

(1) 多因素作用下流域侵蚀输沙过程空间转换方程展望。大量的观测和试验研究表明,地形、土壤、植被和降雨等环境因子的空间异质性是径流输沙尺度效应形成的重要原因,并在特定环境条件下分别建立了侵蚀输沙的空间尺度转换方程。然而,这些经验性的尺度转换方程是依据特定的组合环境获取,具有较强的针对性而难以应用到其他区域<sup>[90-91]</sup>。如何从异质的环境要素出发,对流域水文过程的尺度转换方程进行机理性的解析与预测是尺度效应研究的一个方向<sup>[92]</sup>。高精度遥感和雷达等观测手段为环境要素空间异质特征的定量刻画提供了有力的数据支持,也为空间尺度效应的机制解析和转换方程的量化预测提供了可行的条件<sup>[60-62]</sup>。在未来的研究中可基于环境信息的高精度空间观测,从嵌套流域的异质环境要素定量描述出发,建立能表征环境信息空间特征的综合指标,分析不同尺度上流域径流汇集和河流输沙对环境信息指标的敏感性,以环境指标定量预测径流和输沙的尺度转换方程。流域径流和侵蚀输沙过程与众多环境要素紧密相关,这些环境要素之间也并非相



互独立的,如何提取合理的综合指标是一个难点。近年来,基于对已有研究事实进行数据整合的 Meta 分析等研究方法在多个领域,尤其是在复杂科学问题成因的定量分析方面<sup>[93]</sup>,取得了突破性的进展,机器学习等方法在空间结构信息量化、数据归类和成因解析等方面也得到了广泛的应用<sup>[94-96]</sup>。因此,在流域侵蚀输沙的尺度效应机理解析方面,长期以来的案例研究和新的观测手段可为 Meta 分析和机器学习等新方法的应用提供充足的数据支持,从而为多环境要素条件下侵蚀输沙空间尺度效应的机理解析和定量预测提供一种新的思路<sup>[97]</sup>。

(2) 坡面—小流域—流域连续水沙过程空间尺度效应研究展望。坡面产流侵蚀空间尺度效应的研究多集中在小于  $0.01 \text{ km}^2$  的范围,流域水沙输移的空间尺度效应研究多集中在大于  $100 \text{ km}^2$  的区域,对于面积在  $0.01 \sim 100 \text{ m}^2$  之间小流域尺度上的侵蚀输沙尺度效应较少有研究<sup>[98]</sup>,该空间范围内水文过程的研究对补足从坡面到流域的连续尺度效应研究至关重要<sup>[99]</sup>。此外,小流域还连接坡面与河流,在河流物质传送和信息交换中具有重要的地位<sup>[100-102]</sup>,然而,这种小型流域往往又具有季节性明显、边界多变、阻力源复杂等特征,其泥沙传输机制与河流输沙特征是否一致等方面尚不明晰,这也是空间尺度效应机制研究的一个关键<sup>[103]</sup>。小流域侵蚀输沙连接坡面侵蚀和河道输沙过程,涉及生态学、河流工程学和土壤侵蚀学等多个学科,不同的学科在各自研究方向有相应的研究优势,如,生态学家于对景观要素空间异质性的量化表述,土壤侵蚀学在不同尺度侵蚀输沙的影响因素方面积累了丰富的研究,河流工程学在泥沙扩散和沉积动力机制等方面的研究更成熟。因此,如何借鉴不同学科的研究优势,在多学科交叉融合的基础上进一步理解流域侵蚀输沙空间尺度效应形成的原因,构建具有物理机制的尺度转换方程也是该领域的一个重点方向。长期以来在小流域尺度上尚缺少连续有效观测,限制了从坡面到流域的径流—侵蚀—输沙过程的空间尺度效应研究。近年来,新报道的一些观测方法能对小流域尺度径流和输沙过程进行连续追踪,以试验观测的方法补足当前从坡面向流域过渡空间的研究缺失也逐渐成为可能。如,无人机机载平台等新的遥感设备能实时进行河流流量、流速和水位等水文信息的反演<sup>[104-105]</sup>,实现对小流域径流汇演全过程的监测,从而有助于在坡面到流域过渡的空间范围内进行尺度效应形成机制的解析。示踪技术在流域侵蚀泥沙的来源解析方面取得较大进展,能解析不同断面泥沙来源,完成小流域尺度上河流输沙来源的

连续观测,加强坡面到流域过渡范围内的侵蚀输沙尺度效应研究。

(3) 剧烈环境扰动对流域侵蚀输沙空间尺度效应影响的研究展望。剧烈环境变化条件下的水文特征研究是未来水文科学的一个重点方向<sup>[106]</sup>,也给流域侵蚀输沙的空间尺度效应研究带来新的挑战。在强烈的气候变化背景下,极端天气时有发生,严重扰动下垫面的同时也对流域水文过程的尺度效应带来较大影响。如,自然灾害发生后,植被调节水文过程的效应减弱,土壤结构发生一定程度的变化,造成流域产流产沙及其尺度效应的改变<sup>[28]</sup>。人类活动大范围扰动流域下垫面而影响水文过程的尺度效应,如,农田面积扩张和生态重建的实施<sup>[107]</sup>、耕作方式的改变<sup>[27]</sup>和城镇建筑面积的增加<sup>[108-109]</sup>都会改变下垫面水文过程,对流域侵蚀输沙的空间尺度效应造成影响。剧烈的环境变化作用下,流域下垫面将更加复杂且具时间不一致性,这种情况下的流域侵蚀输沙过程的空间尺度问题急需解决。

#### 参考文献:

- [1] Sidle R C. Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedions to catchments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017,175:75-96.
- [2] Guastini E, Zuecco G, Errico A, et al. How does streamflow response vary with spatial scale Analysis of controls in three nested Alpine catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2019,570:705-718.
- [3] Bagarello V, Ferro V, Keesstra S, et al. Testing simple scaling in soil erosion processes at plot scale[J]. *Catena*, 2018,167:171-180.
- [4] 任立良,刘新仁,郝振纯.水文尺度若干问题研究述评[J].*水科学进展*,1996,7(S1):87-99.
- [5] 朱吉生,黄诗峰,李纪人,等.水文模型尺度问题的若干探讨[J].*人民黄河*,2015,37(5):31-37.
- [6] 付兴涛,姚璟.降雨条件下坡长对陡坡产流产沙过程影响的模拟试验研究[J].*水土保持学报*,2015,29(5):20-24.
- [7] 王奇花,高玉凤,田沉,等. EUROSEM 模型对晋西黄绵土坡面侵蚀过程的模拟应用[J].*水利学报*,2021,52(1):120-127.
- [8] 王占礼,黄新会,张振国,等.黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J].*水土保持通报*,2005,25(4):1-4.
- [9] Asadzadeh F, Gorji M, Vaezi A, et al. Scale effect on runoff from filed plots under natural rainfall[J]. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 2012,12(9):1148-1152.
- [10] Zhang X, Hu M, Guo X, et al. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China[J]. *Catena*, 2018,160:394-402.

- [11] Chen L, Sela S, Svoray T, et al. Scale dependence of Hortonian rainfall-runoff processes in a semiarid environment[J]. *Water Resources Research*, 2016,52(7): 5149-5166.
- [12] 郭新亚,张兴奇,顾礼彬,等.坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(2):40-44.
- [13] Moreno M, Nicolau M, Merino L, et al. Plot-scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient[J]. *Water Resources Research*, 2010,46(4): W04503.
- [14] Martinez G, Weltz M, Pierson F B, et al. Scale effects on runoff and soil erosion in rangelands: Observations and estimations with predictors of different availability [J]. *Catena*, 2017,151:161-173.
- [15] Dengfeng L, Fuqiang T, Hongchang H, et al. The role of run-on for overland flow and the characteristics of runoff generation in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2012,57(6):1107-1117.
- [16] 付兴涛.坡面径流侵蚀产沙及动力学过程的坡长效应研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [17] 马春艳,王占礼,谭贞学.黄土坡面产流动态变化过程试验模拟[J].*干旱区农业研究*,2007,25(6):122-143.
- [18] Wu S, Chen L, Wang N, et al. Variable power-law scaling of hillslope Hortonian rainfall-runoff processes [J]. *Hydrological Processes*, 2019,33(22):2926-2938.
- [19] Lemma T M, Gessesse G D, Kassa A K, et al. Effect of spatial scale on runoff coefficient: Evidence from the Ethiopian highlands[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018,6(4):289-296.
- [20] Jourgholami M, Labelle E R. Effects of plot length and soil texture on runoff and sediment yield occurring on machine-trafficked soils in a mixed deciduous forest[J]. *Annals of Forest Science*, 2020,77(1):1-11.
- [21] 黎四龙,蔡强国,吴淑安,等.坡长对径流及侵蚀的影响[J].*干旱区资源与环境*,1998,12(1):29-35.
- [22] 王秀颖,刘和平,刘宝元.变雨强人工降雨条件下坡长对径流的影响研究[J].*水土保持学报*,2010,24(6):1-5,10.
- [23] 方海燕,蔡强国,李秋艳.黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究[J].*地理研究*,2009,28(3):583-591.
- [24] Stomph J, Ridder N, Steenhuis S, et al. Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics: laboratory validation of a process-based model[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002,27(8): 847-855.
- [25] Langhans C, Govers G, Diels J, et al. Modeling scale-dependent runoff generation in a small semi-arid watershed accounting for rainfall intensity and water depth [J]. *Advances in Water Resources*, 2014,69(4):65-78.
- [26] Mounirou L, Zouré O, Yonaba R, et al. Multi-scale analysis of runoff from a statistical perspective in a small Sahelian catchment under semi-arid climate[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020,13(4):1-16.
- [27] Langhans C, Diels J, Clymans W, et al. Scale effects of runoff generation under reduced and conventional tillage[J]. *Catena*, 2019,176:1-13.
- [28] Kasraie L. Overland flow scaling behavior in a burned dry hillslope [D]. Melbourne: University of Melbourne, 2020.
- [29] Prats S, Malvar M, Vieira D, et al. Effectiveness of hydro-mulching to reduce runoff and erosion in a recently burnt pine plantation in central Portugal[J]. *Land Degradation & Development*, 2016,27(5):1319-1333.
- [30] 吴松柏.坡面水力侵蚀过程中坡度与尺度效应研究[D].武汉:武汉大学,2017.
- [31] Evans R, Taylor J. Some methods of directly assessing water erosion of cultivated land-a comparison of measurements made on plots and in fields[J]. *Progress in Physical Geography*, 1995,19(1):115-129.
- [32] Parsons A J, Brazier R E, Wainwright J, et al. Scale relationships in hillslope runoff and erosion[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010,33(10):1637-1638.
- [33] Wilcox B P, Breshears D D, Allen C D. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance [J]. *Ecological Monographs*, 2003,73(2):223-239.
- [34] Yair A, Yassif N. Hydrological processes in a small arid catchment: Scale effects of rainfall and slope length[J]. *Geomorphology*, 2004,61(1):155-169.
- [35] Ghahramani A, Ishikawa Y, Gomi T. Slope length effect on sediment and organic litter transport on a steep forested hill-slope:upscaling from plot to hillslope scale[J]. *Hydrological Research Letters*, 2011,5:16-20.
- [36] 蔡强国.坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J].*泥沙研究*,1989,8(4):84-91.
- [37] Koomson E, Muoni T, Marohn C, et al. Critical slope length for soil loss mitigation in maize-bean cropping systems in SW Kenya[J]. *Geoderma Regional*, 2020, 22:e00311.
- [38] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J].*土壤学报*,1989,26(2):109-116.
- [39] Bagio B, Bertol I, Wolschick N H, et al. Water erosion in different slope lengths on bare soil[J]. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 2017,41:1-15.
- [40] 陈永宗,景可,蔡强国.黄土高原现代治理[M].北京:科学出版社,1988.
- [41] 张乐涛.基于侵蚀能量的径流输沙尺度效应研究[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院;教育部水土保持与生



- 态环境研究中心,2016.
- [42] 王文龙,雷阿林,李占斌,等.土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟流动力机制研究[J].水科学进展,2003,14(4):371-375.
- [43] 雷阿林,唐克丽,王文龙,等.土壤侵蚀链概念的科学意义及其特征[J].水土保持学报,2000,14(3):79-83.
- [44] Parsons A J, Stromberg S G L. Experimental analysis of size and distance of travel of unconstrained particles in interrill flow[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(9):2377-2381.
- [45] Parsons A J, Wainwright J, Mark Powell D, et al. A conceptual model for determining soil erosion by water [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2004, 29(10):1293-1302.
- [46] 孔亚平,张科利,唐克丽.坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J].水土保持学报,2001,15(2):17-20,24.
- [47] Elh C. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004,104(2):317-332.
- [48] Delmas M, Pak L, Cerdan O, et al. Erosion and sediment budget across scale: A case study in a catchment of the European loess belt[J]. *Journal of Hydrology*, 2012,420:255-263.
- [49] Kidron G J. Runoff generation and sediment yield on homogeneous dune slopes: Scale effect and implications for analysis[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2011,36(13):1809-1824.
- [50] Zhang Q, Liu J, Yu X, et al. Scale effects on runoff and a decomposition analysis of the main driving factors in Haihe Basin mountainous area[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,690:1089-1099.
- [51] Mills C F, Bathurst J C. Spatial variability of suspended sediment yield in a gravel-bed river across four orders of magnitude of catchment area[J]. *Catena*, 2015, 133:14-24.
- [52] Lange J. Dynamics of transmission losses in a large arid stream channel[J]. *Journal of Hydrology*, 2005,306(1):112-126.
- [53] McGlynn B L, McDonnell J J, Seibert J, et al. Scale effects on headwater catchment runoff timing, flow sources, and groundwater - streamflow relations[J]. *Water Resources Research*, 2004,40(7):379-405.
- [54] Freeman M C, Pringle C M, Jackson C R. Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010,43(1):5-14.
- [55] Inoubli N, Raclot D, Mekki I, et al. A spatiotemporal multiscale analysis of runoff and erosion in a Mediterranean Marly catchment [J]. *Vadose Zone Journal*, 2017,16(12):1-12.
- [56] Sivapalan M. Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: Is there a connection[J]. *Hydrological Processes*, 2003,17(17):1037-1041.
- [57] Merz R, Parajka J, Blöschl G. Scale effects in conceptual hydrological modeling[J]. *Water Resources Research*, 2009,45(9):627-643.
- [58] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: A review [J]. *Hydrological Processes*, 1995,9(3):251-290.
- [59] 李彬权,朱畅畅,梁忠民,等.基于分形理论的新安江模型参数空间尺度效应分析[J].南水北调与水利科技:中英文,2020,18(3):1-14.
- [60] Cristiano E, Veldhuis M, Wright D, et al. The influence of rainfall and catchment critical scales on urban hydrological response sensitivity[J]. *Water Resources Research*, 2019,55(4):3375-3390.
- [61] Miyata S, Gomi T, Sidle R C, et al. Assessing spatially distributed infiltration capacity to evaluate storm runoff in forested catchments: Implications for hydrological connectivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,669:148-159.
- [62] Veldhuis M, Zhou Z, Yang L, et al. The role of storm scale, position and movement in controlling urban flood response[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018,22(1):417-436.
- [63] Cristiano E, Veldhuis M, Gaitan S, et al. Critical scales to explain urban hydrological response: An application in Cranbrook, London[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018,22(4):2425-2447.
- [64] Cerdan O, Bissonnais Y L, Govers G, et al. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy[J]. *Journal of Hydrology*, 2004,299(1):4-14.
- [65] Bergström S, Graham L. On the scale problem in hydrological modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 1998,211(4):253-265.
- [66] Schilling K E, Helmers M. Tile drainage as karst: Conduit flow and diffuse flow in a tile-drained watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2008,349(4):291-301.
- [67] McDonnell J, Sivapalan M, Vaché K, et al. Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology[J]. *Water Resources Research*, 2007,43(7):1-6.
- [68] Sun P, Wu Y, Xiao J, et al. Remote sensing and modeling fusion for investigating the ecosystem water-carbon coupling processes[J]. *Science of the Total Environment*

- ronment, 2019,697:134064.
- [69] Cammeraat L H. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2002,27(11):1201-1222.
- [70] Gómez J, Nearing M, Giráldez J, et al. Analysis of sources of variability of runoff volume in a 40 plot experiment using a numerical model[J]. *Journal of Hydrology*, 2001,248(1):183-197.
- [71] Nearing M A, Govers G, Norton L D. Variability in soil erosion data from replicated plots[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999,63:1829-1835.
- [72] Li T, Wang G, Xue H, et al. Soil erosion and sediment transport in the gullied Loess Plateau: Scale effects and their mechanisms[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009,52(5):1283-1292.
- [73] Bartley R, Speirs W J, Ellis T W, et al. A review of sediment and nutrient concentration data from Australia for use in catchment water quality models [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012,65(4):101-116.
- [74] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. *Catena*, 2005,63(2):132-153.
- [75] Lane L J, Hernandez M, Nichols M. Processes controlling sediment yield from watersheds as functions of spatial scale [J]. *Environmental Modelling & Software*, 1997,12(4):355-369.
- [76] Chorley R J, Schumm S A, Sugden D E. *Geomorphology*[M]. London: Methuen, 1984.
- [77] 闫云霞,许炯心, Hasson M,等.长江流域侵蚀产沙尺度效应的区域分异[J].*山地学报*,2011,29(2):15-27.
- [78] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers[J]. *Journal of Geology*, 1992,100(5):525-544.
- [79] Dedkov A P, Mozzherin V I. *Erosion and sediment yield in mountain regions of the world*[R]. Chengdu: Iahs Publish, 1992.
- [80] De Vente J, Poesen J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005,71(1/2):95-125.
- [81] Xu J, Yan Y. Scale effects on specific sediment yield in the Yellow River basin and geomorphological explanations[J]. *Journal of Hydrology*, 2005,307(1):219-232.
- [82] 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*,2007,32(1):17-23.
- [83] 颜明,郑明国,舒畅,等.泾河流域径流—泥沙的尺度效应研究[J].*水土保持通报*,2016,36(6):184-188,194.
- [84] 颜明,贺莉,郑明国,等.泾河流域高含沙水流的尺度效应研究[J].*水土保持学报*,2017,31(4):75-80.
- [85] 张晓明,曹文洪,武思宏,等.泥沙输移比尺度依存及分形特征[J].*水利学报*,2013,44(10):1225-1232.
- [86] 张晓明,曹文洪,周利军,等.泥沙输移比及其尺度依存研究进展[J].*生态学报*,2014,34(24):7475-7485.
- [87] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].*水土保持学报*,2020,34(4):21-30.
- [88] Liu B, Nearing M A, Shi P, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000,64(5):1759-1763.
- [89] Amore E, Modica C, Nearing M A, et al. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins[J]. *Journal of Hydrology*, 2004,293(1/4):100-114.
- [90] Mutema M, Chaplot V, Jewitt G, et al. Annual water, sediment, nutrient, and organic carbon fluxes in river basins: A global meta-analysis as a function of scale[J]. *Water Resources Research*, 2015,51(11):8949-8972.
- [91] Lintern A, Webb J A, Ryu D, et al. Key factors influencing differences in stream water quality across space [J]. *Wires Water*, 2018,5(1):1-31.
- [92] Lintern A, Webb J A, Ryu D, et al. What are the key catchment characteristics affecting spatial differences in riverine water quality? [J]. *Water Resources Research*, 2018,54(10):7252-7272.
- [93] Gurevitch J, Koricheva J, Nakagawa S, et al. Meta-analysis and the science of research synthesis[J]. *Nature*, 2018,555(7695):175-182.
- [94] Grekousis G. Artificial neural networks and deep learning in urban geography: A systematic review and meta-analysis[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019,74:244-256.
- [95] Chang K, Merghadi A, Yunus A P, et al. Evaluating scale effects of topographic variables in landslide susceptibility models using GIS-based machine learning techniques[J]. *Scientific Reports*, 2019,9(1):12296.
- [96] Künzel S, Sekhon J, Bickel P, et al. Metalearners for estimating heterogeneous treatment effects using machine learning[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019,116(10):4156-4165.
- [97] Miller H J, Goodchild M F. Data-driven geography[J]. *Geojournal*, 2015,80(4):449-461.
- [98] Vereecken H, Schnepf A, Hopmans J, et al. Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016,15(5): doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131.

- 火成演替群落数量分类[J].生态学杂志,2019,38(6):1926-1936.
- [19] 刘凤娇.长白落叶松人工林林下植被生物量与多样性研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- [20] 郑拴丽,许文强,杨辽,等.新疆阿尔泰山森林生态系统碳密度与碳储量估算[J].自然资源学报,2016,31(9):1553-1563.
- [21] Liu X J, Pan C D. Effects of recovery time after fire and fire severity on stand structure and soil of Larch forest in the Kanas National Nature Reserve, north-west China [J]. Journal of Arid Land, 2019,11(6):811-823.
- [22] 蔡文华,杨健,刘志华,等.黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子[J].生态学报,2012,32(11):3303-3312.
- [23] Wang W, He H, Spetich M, et al. A large-scale forest landscape model incorporating multi-scale processes and utilizing forest inventory data [J]. Ecosphere, 2013,4(9):1-23.
- [24] 赵敏,周广胜.中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析[J].地理科学,2004,24(1):50-54.
- [25] 邹梦玲.大兴安岭火烧迹地植被恢复对碳储量的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [26] Vega J A, Fernández C, Pérez-Gorostiaga P, et al. Response of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) recruitment to fire severity and post-fire management in a coastal burned area in Galicia (NW Spain)[J]. Plant ecology, 2010,206(2):297-308.
- [27] New T. Insects, Fire and Conservation[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2014:1-20.
- [28] Zhu J J, Lu D L, Zhang W D. Effects of gaps on regeneration of woody plants: A meta-analysis[J]. Journal of Forestry Research, 2014,25(3):501-510.
- [29] Muscolo A, Sidari M, Mercurio R. Influence of gap size on organic matter decomposition, microbial biomass and nutrient cycle in Calabrian pine(*Pinus laricio*, Poir.) stands[J]. Forest Ecology and Management, 2007,242(2):412-418.
- [30] 岳军伟,关晋宏,邓磊,等.甘肃亚高山云杉人工林生态系统碳、氮储量动态和分配格局[J].生态学报,2018,38(21):7790-7800.
- [31] 刘冰燕,陈云明,曹扬,等.秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局[J].应用生态学报,2015,26(3):643-652.

~~~~~  
(上接第97页)

- [99] Fiener P, Wilken F, Auerswald K. Filling the gap between plot and landscape scale-eight years of soil erosion monitoring in 14 adjacent watersheds under soil conservation at Scheyern, Southern Germany[J]. Advances in Geosciences, 2019,48:31-48.
- [100] Alexander R B, Boyer E W, Smith R A, et al. The role of headwater streams in downstream water quality[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007,43(1):41-59.
- [101] Nadeau T, Rains M. Hydrological connectivity between headwater streams and downstream waters: How science can inform policy1[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007,43(1):118-133.
- [102] Creed I F, Lane C R, Serran J N, et al. Enhancing protection for vulnerable waters[J]. Nature Geoscience, 2017,10(11):809-815.
- [103] Mutema M, Jewitt G, Chivenge P, et al. Spatial scale impact on daily surface water and sediment fluxes in Thukela river, South Africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2016,92:34-43.
- [104] Kinzel P J, Legleiter C J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric lidar[J]. Remote Sensing, 2019,11(19):doi. org/10.3390/rs11192317.
- [105] Fulton J W, Anderson I E, Chiu C L, et al. QCam: SUAS-based Doppler radar for measuring river discharge[J]. Remote Sensing, 2020,12(20):doi. org/10.3390/rs12203317.
- [106] Wagener T, Sivapalan M, Troch P A, et al. The future of hydrology: An evolving science for a changing world[J]. Water Resources Research, 2010,46(5):doi. org/10.1029/2009 WR008906.
- [107] 张光辉.植被恢复背景下土壤侵蚀研究需要加强的内容[J].中国水土保持,2020,41(9):76-79.
- [108] Golden H E, Hoghooghi N. Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2018,5(1):e1254.
- [109] Ichiba A, Gires A, Tchiguirinskaia I, et al. Scale effect challenges in urban hydrology highlighted with a distributed hydrological model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018,22(1):331-350.