

泥沙输移比的研究方法及成果分析

李林育^{1,2}, 焦菊英^{1†}, 陈杨³

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究所, 510635, 广州;
3. 沈阳农业大学水利学院, 110161, 沈阳)

摘要 泥沙输移比是反映流域侵蚀产沙输移能力的指标,对正确评价水土保持减沙效益及流域治理决策有着重要的科学意义与应用价值。对国内外泥沙输移比的研究方法及成果进行总结与分析,认为泥沙输移比的研究方法可分为直接计算(根据定义)与模型计算(通过建立泥沙输移比模型)2种。直接计算的关键是土壤侵蚀量的获取,而计算模型目前主要有因子经验模型、分布式模型与物理模型。在对泥沙输移比研究中土壤侵蚀量获取方法及建立的泥沙输移比模型进行总结与评述的基础上,按黄河流域、长江流域、国内其他地区及国外一些地区,分析了其泥沙输移比的研究成果,讨论了目前泥沙输移比研究中存在的3个问题及今后的发展方向。

关键词 泥沙输移比; 侵蚀量; 输沙量; 泥沙输移比模型; 研究方法; 成果分析

Research methods and results analysis of sediment delivery ratio

Li Linyu^{1,2}, Jiao Juying¹, Chen Yang³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Northwest A & F University, 712100, Yangling, Shaanxi;
2. Pearl River Institute of Hydraulic Research, 510635, Guangzhou;
3. College of Water Resources, Shenyang Agricultural University, 110161, Shenyang: China)

Abstract Sediment delivery ratio (SDR) is an index that reflects the transport capacity of eroded sediment in the watershed, and has both scientific significance and application values for benefit evaluation on sediment reduction of soil and water conservation and decision-making of watershed management. This paper summarizes and analyses the research methods and results of the SDR at home and abroad. There are two methods in the SDR research: direct calculation based on the definition of SDR and model calculation based on SDR models. The key of the direct calculation is how to obtain soil erosion amount, while the calculation models mainly includes three kinds at present: factor empirical model, distributed model and physical model. Based on the summarization and review of the soil erosion amount obtaining methods and existed SDR models, the research results of SDR in Yellow River Basin, Yangtze River Basin, other domestic regions, and some regions abroad are analyzed, and the problems research direction of SDR are discussed.

Key words sediment delivery ratio; erosion amount; sediment runoff; SDR model; research method; result analysis

从土壤侵蚀量到输沙量,中间要经过冲刷、输移、沉积、再搬运等复杂过程,泥沙无论在数量上还是物理特性上都发生了很大变化,二者之间存在转换系数,即泥沙输移比(sediment delivery ratio,SDR)。

收稿日期: 2009-02-07 修回日期: 2009-07-07

项目名称: 国家重点基础研究发展计划项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”课题“区域水土流失过程与趋势分析”(2007CB407203); 国家科技支撑计划项目课题“黄土高原水土流失综合防治技术研究”(2006BAD09B10)

第一作者简介: 李林育(1983—),男,硕士研究生。主要研究方向: 侵蚀产沙与环境效益评价。E-mail: anshan.83823@163.com

† 责任作者简介: 焦菊英(1965—),女,研究员。主要研究方向: 植被恢复与水土保持环境效益评价。E-mail: jiaojuying@yahoo.com.cn

泥沙输移比是 Brown 在 1950 年估计美国入海泥沙数量时提出的^[1]。在美国泥沙工程手册^[2]中,泥沙输移比为泥沙从侵蚀点向下游任何指定位置移动过程中侵蚀泥沙因沿途沉积而减小的程度。一般将泥沙输移比定义为流域出口处某一断面实测的输沙量与断面以上流域侵蚀产沙量之比。景可等^[3]在界定泥沙输移比 3 个条件(泥沙粒径、时间系列及空间范围)的前提下,给出了比较完整的定义,并得到较广泛的认可^[4-6],即一定时间和空间范围内,流域某过水断面输出小于某一粒级的泥沙量与断面以上侵蚀量中的同粒级泥沙量之比。

泥沙输移比是研究流域侵蚀产沙关系的重要数据,可用于推求流域的土壤侵蚀量^[7],国家最新颁布的 SL 190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》^[8]中,就明确提出利用输沙模数资料及泥沙输移比来推求水蚀侵蚀模数。泥沙输移比的大小可直接反映侵蚀泥沙入河量的多少,以及对下游河道安危、水库使用年限的影响程度;反过来,还可揭示流域土壤侵蚀的实际情况,加强对流域土壤侵蚀程度和危害的认识。目前国内有关泥沙输移比的研究相对薄弱,通过维普数据库(1989—2008 年)查询到的相关文献不足 30 篇,且集中于黄河中游和长江上游;同时,由于研究方法及技术手段的限制,研究结果差异很大,在科学理论与实际应用方面仍存在较大的距离。蔡强国等^[4]已对泥沙输移比影响因子及其关系模型进行了评述,本文将对泥沙输移比的研究方法及成果进行总结与分析,以期为我国泥沙输移比及土壤侵蚀预报的进一步研究提供参考。

1 泥沙输移比的研究方法

1.1 直接算法

泥沙输移比的计算必须具备通过断面的输沙量和断面以上流域的侵蚀量,其中,输沙量是水文观测中的基本测量项目,代表了水文站控制地区气候和地面条件综合作用下产生的泥沙到达流域出口的数量。虽然在很多中小流域没有水文站控制,但可通过有目的地布设测站直接获取输沙量;而流域的侵蚀量长期以来是一个未知量,有些学者只能用输沙量来替代侵蚀量;可见,求取泥沙输移比的关键在于土壤侵蚀量的获取。在泥沙输移比研究中,主要利用的方法有 3 种。

1) 实测调查法。主要是通过径流小区或单元小流域实测资料^[9],或调查水库(塘坝)泥沙淤积量^[10],或实地调查研究区不同侵蚀类型的侵蚀

量^[11]来获取。

2) 地球化学法。利用稀土元素(REE)示踪法^[12]或放射性核素示踪技术^[13],测算某一特定时段内土壤侵蚀速率,计算土壤侵蚀量。

3) 模型法。利用已经建立的土壤侵蚀模型,通过获取侵蚀模型中各因子的参数值,计算得到土壤侵蚀量^[14-15]。

另外,也可采用遥感技术编制土壤侵蚀图,量算不同等级土壤侵蚀程度的面积,根据不同级别的侵蚀模数计算年平均侵蚀量,再结合控制水文站实测输沙量,计算泥沙输移比^[16]。

1.2 模型算法

模型算法就是通过建立的泥沙输移比模型来计算 SDR 值,目前利用的方法主要有 3 种。

1) 泥沙输移比因子经验模型。通过选取影响输移比的主要因素,在求得 SDR 值的情况下,选择与泥沙输移比相关性最好的一个或多个因子作为自变量,建立泥沙输移比与主要影响因子的经验模型。泥沙输移比因子经验模型很多,考虑的因子各不相同,如泥沙输移比与流域面积之间的对数^[11,17]或幂函数关系方程^[18],与流域面积和年径流量间的经验方程^[19],与降雨量、径流系数、最大水流含沙量及量纲为 1 雨型因子之间的回归方程^[20],与流域面积及沟道密度之间的关系式^[21],与流域地形起伏率(流域最大高差与流域最大长度之比,量纲为 1)之间的对数关系式^[22],与流域面积、流域地形起伏率和流域加权平均分叉比(给定等级河段数与高一级的河段数之比)之间的关系方程^[23],与流域面积、流域地形起伏率及径流曲线弯曲的峰值数之间的关系方程^[24],与坡度和土壤下渗率的关系式及坡长和土壤可蚀性的关系式^[25]等。

2) 分布式泥沙输移比模型。分布式泥沙输移比模型主要是将研究区域划分成不同的形态单元,通过选取影响泥沙输移比的因子或特征参数,计算不同地块单元的泥沙输移比。在数据量大的情况下,结合 GIS、RS 等空间分析技术,以相对均质的栅格数据为基础,建立不同影响因子图层,根据计算公式叠加生成研究区的泥沙输移比分布图。如 V. Ferro 等^[26]建立的泥沙输移分布模型 SEDD (sediment delivery distributed model),确定了泥沙输移系数与中值输移时间与泥沙输移比的关系;R. H. Fraser 等^[27]开发的基于 GIS 的分布式泥沙输移比评估模型 SEDMOD (spatially explicit delivery model),考虑影响泥沙输移的 6 个关键因子:流经的坡度、流经的坡

形、流经的地表粗糙度、与河道的距离、土壤质地、坡面径流特征; K. J. Lim 等^[28]开发的有效控制侵蚀的泥沙评估工具 SATEEC (GIS-based sediment assessment tool for effective erosion control), 其中的分布式泥沙输移比是由流域面积、流域地形起伏率及流域土壤保持曲线数与泥沙输移比之间的关系方程来计算的。目前国内还没有分布式泥沙输移比模型的研发, 只是将 SEDD 模型在岷江上游进行了应用^[29]。

3) 泥沙输移比的物理模型。随着土壤侵蚀机制研究的不断深入, 基于侵蚀过程的泥沙输移比物理模型也有研发。张光科等^[30]在分析泥沙输移比主要影响因素的基础上, 分别对坡面单位面积输沙率和坡面单位面积产沙率进行了量纲分析, 提出了山区流域泥沙输移比的计算公式; 随后, 张光科等^[31]又从雨滴溅蚀、径流侵蚀(包括细沟流侵蚀)的物理机制出发, 推出了雨滴侵蚀公式和径流侵蚀公式, 用 Yalin 推移质公式和 Einstein 悬移质挟沙力公式作为控制, 计算坡面的泥沙输移比。王协康等^[5]

将流域划分为坡面系统及沟道系统, 引入了粒径与时段因子, 利用因次分析法分别推求各系统的泥沙输移比公式。Lu. H.^[32]在考虑到侵蚀产沙源特征类型、泥沙沉积和水文控制条件等因素的情况下, 提出了由坡面沉积及沟道沉积 2 种线性方程构成的简单的概念模型, 并对泥沙输移比与流域面积及泥沙输移过程中复杂形式间的关系进行了理论推演, 该模型采用 4 个量纲为 1 的尺度因子, 可较好地分析泥沙输移比的空间变化特征。

2 泥沙输移比的研究成果

2.1 黄河流域

黄河流域泥沙输移比的主要研究成果如表 1 所示, 可以看出, 泥沙输移比的研究主要集中在黄河中游的黄土高原地区, 在黄河下游主要为三门峡至利津河道的排沙比^[33]、进入下游河道的入海泥沙通量比率^[34], 以及黄河改道清水沟以来输入外海泥沙的比例^[35]等; 而在黄河上游的研究尚未涉及。

表 1 黄河流域泥沙输移比的主要研究成果

Tab. 1 Main research results of SDR in the Yellow River Basin

区域	方法	结果	来源
黄土丘陵沟壑区	据沟道小流域泥沙产生、输移和沿程冲淤变化, 中游各级支流泥沙输送和冲淤变化及河龙区间干流泥沙的冲淤情况分析泥沙输移比	黄河中游主要产沙地区的泥沙输移比多年平均接近 1	龚时功等 ^[36]
无定河支流的大理河流域	采用单元流域(面积 < 1.0 km ² , 包含坡面、沟坡和沟道 3 部分地貌单元组成的完整小流域)作为泥沙的产地, 将其他不同大小流域面积的中、小流域输沙模数与单元流域侵蚀模数之比定义为泥沙输移比	陕北大理河流域各级面积下(团山沟-绥德)的多年平均(1959—1969)泥沙输移比为 0.80~1.31	牟金泽等 ^[37]
黄土高原地区	根据河床纵横剖面的特征、河床组成物质的特征、不同时期大断面面积套绘、径流特性等综合指标, 进行分析与判断	绝大多数地区泥沙输移比接近 1, 只有渭河下游、河套谷地、汾河中下游及晋西北宽谷区泥沙略有沉积	景可 ^[38]
晋西羊道沟小流域	根据 1963—1968 年 40 余次降雨观测资料, 利用羊道沟出口断面观测的输沙量与该断面上流域各地貌部位(除沟道外)侵蚀量之和计算泥沙输移比	羊道沟小流域多年泥沙输移比约为 1, 年度泥沙输移比为 0.36~1.12, 次降雨泥沙输移比为 0.36~1.85	蔡强国等 ^[20]
黄河中游地区	依据岔巴沟、韭园沟、南小河沟、赵家川和党家川等流域的实测资料, 采用文献 ^[37] 中的方法, 并附加 3 个条件(单元流域必须在对比的中、小流域之内以保证侵蚀物质的类型、粒径与土壤质地结构相近; 单元流域与对比的中、小流域的植被与土地利用情况相近; 单元流域与对比的中、小流域的相应暴雨特征相近), 计算次暴雨洪水泥沙输移比	黄河中游地区小流域一次暴雨泥沙输移比在 0.7~1.0 之间, 36 次暴雨洪水的泥沙输移比平均为 0.8, 有 5 次暴雨的泥沙输移比大于 1	曹文洪等 ^[39]
米脂县泉家沟小流域	从土壤侵蚀的微观物理机制入手, 分析降雨侵蚀分离能力和径流搬运容量的相互关系, 推导出黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀泥沙输移比模型; 并利用典型降雨年 1987 年径流和侵蚀观测点的数据求取泥沙输移比	泉家沟流域(5.19 km ²) 1987 年泥沙输移比为 0.84	刘黎明 ^[40]
泾河、北洛河	先通过河床性质、河床断面的冲淤变化、河谷两侧堆积状况、沟谷有无堆积形态等定性指标判断, 然后利用土壤侵蚀模型计算的各侵蚀形态类型区侵蚀量及输沙量测验值计算泥沙输移比	周河为 0.912, 金佛坪为 0.908, 北洛河支流刘家河为 0.91, 泾河支流马莲河洪德站为 0.914, 庆阳(西)为 0.905, 雨落坪为 0.89	景可 ^[41]

续表 1

区域	方法	结果	来源
黄土高原	采用文献[37]中计算泥沙输移比的方法,利用黄土丘陵沟壑区的韭园沟、王家沟、岔巴沟和高原沟壑区的南小河水文测验资料进行计算	不同小流域 SDR 多年平均值未治理时为 0.75 ~ 1.38,治理时为 0.314 ~ 0.478	陈浩等 ^[42]
淳化、洛川	标准径流小区量测的流失量作为侵蚀量,小集水区中拦蓄工程的泥沙拦蓄量作为输沙量,求取泥沙输移比	21 个集水区的泥沙输移比在 0.27 ~ 0.97 之间,平均为 0.664	赵晓光等 ^[9]
无定河流域	以出口控制站的输沙量代表全流域产沙量,水库拦沙、淤地坝拦沙和灌溉引沙量之和表示沉积汇的沉积量(沉积汇),沉积汇与产沙量之和为侵蚀量(侵蚀源),再根据泥沙输移比 = 1 - (沉积汇/侵蚀源),计算无定河流域历年泥沙输移比	在天然状况下,无定河流域的泥沙输移比接近 1;20 世纪 60 年代开展水土流失治理后的泥沙输移比为 0.2 ~ 0.4	许炯心等 ^[43]
大理河谷巴沟流域	以团山沟(0.18 km ²)作为单元小流域,确定径流深与侵蚀产沙模数间的关系;利用其他中、小流域已知的径流深(大于 1 mm)得到次暴雨侵蚀产沙模数,各次暴雨的输沙模数与单元小流域侵蚀模数之比即为泥沙输移比	次暴雨泥沙输移比为 0.29 ~ 1.63,年泥沙输移比为 0.48 ~ 1.40,多年平均泥沙输移比为 0.85 ~ 0.99	刘纪根等 ^[44]
黄河下游河道	以实测水文泥沙资料为基础,研究黄河下游河道泥沙输移中的排沙比	黄河下游三门峡至利津段 1950—1960 年排沙比为 0.724,1961—1964 年为 1.535,1965—1973 年为 0.677,1974—1984 年为 0.740	许炯心 ^[33]
黄河下游河道	定义入海泥沙通量比率 = 入海泥沙通量/进入下游河道的泥沙量,其中,入海泥沙通量为黄河入海泥沙控制站利津站的输沙量,进入下游河道的泥沙量为三门峡站、伊洛河口控制站黑石关站、沁河口控制站小董站三站输沙量之和	不同泥沙粒度组成的入海泥沙通量比率为 0.4 ~ 1.7;当含沙量高于 300 kg/m ³ 时,入海泥沙通量比率低于 0.50	许炯心 ^[34]
黄河口	采用数学模型和资料分析的方法对清水沟时期黄河入海泥沙的输移扩散规律进行分析研究	黄河改道清水沟以来(1977—2000 年)排沙比达 54%,平均每年输入外海泥沙的绝对量为 2.83 亿 t	张世奇 ^[35]

2.2 长江流域

长江流域泥沙输移比的研究最早是 20 世纪 80 年代初由史德明提出的,认为长江上游金沙江流域的 SDR 值为 0.25^[45],随后又研究了三峡库区的 SDR 值,为 0.28^[46]。后来随着三峡枢纽工程兴建可行性

论证的需要,长江流域泥沙输移比的研究逐渐开展起来,多集中于长江上游地区,在长江下游地区的研究表现为长江干流河段的输移比^[47]及湖泊与水库的排沙比^[48-50],而长江下游不同流域或地区的泥沙输移比研究涉及不多,主要研究成果见表 2。

表 2 长江流域泥沙输移比的主要研究成果

Tab.2 Main research results of SDR in the Yangtze River Basin

区域	方法	结果	来源
金沙江、嘉陵江流域	采用遥感技术编制的 1 50 万土壤侵蚀图,量算典型流域不同等级土壤侵蚀程度的面积,根据不同级别的侵蚀模数计算各流域的年平均侵蚀量,再结合控制水文站实测输沙量计算泥沙输移比	金沙江干流渡口至屏山段(7 万 1 165 km ²)及嘉陵江西汉水谭家坝以上地区(9 538 km ²)为 0.61,其余大小支流水系(650 ~ 1 万 4 781 km ²)为 0.14 ~ 0.48	刘毅等 ^[16]
嘉陵江中下游李子溪流域	应用卫星影像数据和 DEM,提取植被盖度、坡度、土地利用等信息,对治理前(1986 年)和治理后(1999 年)的土壤侵蚀进行评价,根据土壤侵蚀强度和面积计算侵蚀量,并结合赵家祠水文站实测输沙量计算泥沙输移比	李子溪流域(683 km ²)泥沙输移比由 1986 年(治理前)的 0.27 降低到 1999 年(治理后)的 0.11	范建容等 ^[51]
长江上游流域	根据不同时期大断面比较、典型水库沉积泥沙还原计算、河床堆积物分析、河流纵比降比较、河谷两岸堆积形态的评估以及主要侵蚀类型的认定等,进行分析	长江上游的 SDR 值超过 0.7,高山区时段 SDR 接近 1,丘陵宽谷区 SDR 不会小于 0.5(不包括泥石流在内的重力侵蚀)	景可 ^[52]

续表 2

区 域	方 法	结 果	来 源
云贵高原 龙川江上游	根据典型小流域水库淤沙资料建立输沙模数与流域面积的关系,求得龙川江上游地区平均土壤侵蚀模数;结合小流域水库(塘坝)控制流域的淤沙量资料及小河口水文站多年平均输沙量,计算泥沙输移比	龙川江上游 8 条典型小流域(10.8 ~ 216.8 km ²) SDR 值为 0.42 ~ 0.80;小河口水文站控制区(1 788 km ²)为 0.26	文安邦等 ^[10]
四川紫色 土地地区	依据鹤鸣观与李子口小流域实测水沙资料及分布式侵蚀产沙模型计算流域侵蚀总量,结合流域出口产沙总量观测值求次降雨泥沙输移比	鹤鸣观(1.7 km ²)与李子口(19.63 km ²)小流域次降雨 SDR 值分别为 0.095 ~ 0.812 和 0.205 ~ 0.473,平均约 0.3	袁再健等 ^[53]
陕西秦岭 以南地区	根据陕南水文泥沙及水土保持资料,由泥沙中悬移质(输沙量)和推移质(沉积量)之间的比例关系得到泥沙输移比	陕南 16 个流域或地区的 SDR 值介于 0.24 ~ 0.59 之间	吴成基等 ^[54]
川中丘陵 区内江附近 小河口	采用 DEM 法测算沟谷的盆腔体积,根据阶地绝对年龄,计算流域自然侵蚀速率,并估算流域内松散堆积物体积,得到流域的自然泥沙输移比	川中丘陵区小流域(10.88 km ²)自然泥沙输移比为 0.997,接近 1	张信宝等 ^[55]
川中紫色 土丘陵区	采用 ¹³⁷ Cs 核素示踪法测定并计算小流域多年平均侵蚀模数,调查的不同小流域多年平均淤积模数作为多年平均输沙模数,计算不同流域的泥沙输移比	紫色土丘陵区小流域(0.01 ~ 35.5 km ²) SDR 值为 0.23 ~ 1.00	高旭彪等 ^[56]
岷江上游	以 GIS 为平台,利用 SEDD 模型计算泥沙输移比	镇江关和黑水流域的 SDR 值为 0.042 ~ 0.055;不同土地覆被类型的 SDR 值为 0.009 ~ 0.207	杨孟等 ^[29]
湖北省石 桥铺径流实 验站	根据实测降雨水沙过程,计算雨滴溅蚀量、径流侵蚀量,以坡面流挟沙能力为控制,推求次降雨洪水过程的泥沙输移量和产沙量,二者之比即为次洪水过程的泥沙输移比	实验小区 1965 年 9 次实测降雨水沙过程 SDR 值为 0.72 ~ 0.97,平均 0.84	张光科等 ^[31]
长江宜昌 —武汉河段	运用泥沙收支平衡概念确定三峡水库修建前长江中游宜昌—武汉河段的泥沙输移比;运用数理统计方法,分析 1955—1997 年间河道泥沙输移比对水沙变化的响应	宜昌—武汉河段河道多年(1955—1997 年)平均 SDR 值为 0.869 8	许炯心 ^[47]
三峡库区	以 2003 年三峡库区及坝下水文站水沙整编资料为基础,分析水库上游来水来沙情况,并与 2002 年比较,研究不同阶段水库悬移质泥沙输移的不同特征	蓄水期间排沙比约 10%;2 次洪水过程排沙比近 50%;2 次蓄水过程后排沙比约 15%;全年排沙比为 30% ~ 40%	王俊等 ^[48]
洞庭湖	应用大量实测水文泥沙资料,分析全洞庭湖和西洞庭湖、东、南洞庭湖年际输沙、年内输沙、不同粒径的输沙特点和规律,对主要控制站 1973—1990 年悬移质泥沙粒径资料统计分析,得出洞庭湖区不同粒径泥沙输移比	洞庭湖区不同粒径泥沙输移比:< 0.005 mm 为 35%,0.005 ~ 0.01 mm 为 44%,0.01 ~ 0.025 mm 为 33%,0.025 ~ 0.05 mm 为 18%,0.05 ~ 0.1 mm 为 22%,0.1 ~ 0.25 mm 为 12%,0.25 ~ 0.50 mm 为 9%,0.5 ~ 1 mm 为 40%,平均 27%	黎昔春等 ^[49]
洞庭湖	采用洞庭湖进口和出口 1960—2005 年的年径流量和年输沙量资料进行分析	洞庭湖排沙比年际变化为 15.99% ~ 60.68%,多年平均 29.82%;汛期(6—9 月)的排沙比很小(7、8 月多年平均约 10%),非汛期有 6 个月的时间排沙比大于 100%	张欧阳等 ^[50]

2.3 国内其他地区

1) 燕山地区。卢金发^[57]估算了燕山地区不同岩性流域的侵蚀模数和泥沙输移比,即凝灰岩、粉砂岩及土石山区流域为 0.217 ~ 0.750,片麻岩、砂岩和砂砾岩流域为 0.199 ~ 0.688,花岗岩、震旦系变质岩和火山岩、流纹岩流域为 0.153 ~ 0.562,且泥沙输移比随流域面积呈指数递减关系。

2) 闽东南花岗岩侵蚀区。郑添发等^[58]依据福建晋江安溪县闽东南花岗岩侵蚀区径流试验场

1985—1987 年小区的观测结果,推算的 SDR 值约为 0.42;并根据晋江西溪上游安溪水文站 1952—1987 年 36 a 平均的年悬移质输沙量与 1985 年安溪县水土流失普查资料估计输沙模数,由不同土地利用类型的侵蚀深与面积推算土壤侵蚀模数,计算的泥沙输移比为 0.44;从而断定闽东南花岗岩侵蚀区的泥沙输移比为 0.42 ~ 0.44。

3) 浙江兰溪的红壤坡地。马琨等^[12]利用野外人工模拟降雨和 Eu 定位土芯中子活化分析技术,测

定不同地形、部位土壤侵蚀量,并据实测流失量,确定浙江省兰溪市水土保持试验站红壤坡地泥沙的输移比为:休闲裸坡地 0.20~0.35;顺坡种植油菜—花生地 0.20~0.288。

4) 其他流域。据调查分析,珠江流域的泥沙输移比为 0.39,其中广东境内为 0.36,广西境内为 0.41;海南诸河为 0.26~0.62。另外,韩江流域泥沙

输移比为 0.27~0.55^[61]。

2.4 国外一些地区

国外一些地区泥沙输移比的研究成果主要包括 SDR 值的时间变化特征^[59-60]、空间变化特征^[22]、不同土地利用类型的 SDR^[61]、以及泥沙输移比模型的建立和应用^[62-63]等,如表 3 所示。

表 3 国外一些地区泥沙输移比的主要研究结果

Tab.3 Main research results of SDR in some foreign areas

区域	方法	结果	来源
美国堪萨斯州南部红土丘陵地区	通过调查流域侵蚀量和水库泥沙沉积量数据,计算得到该地区的泥沙输移比;总侵蚀量包括面蚀和沟蚀,面蚀采用 Musgrave 方程计算,沟蚀通过比较不同时期沟床扩张程度得到	Red Hills 地区 25 个净泥沙贡献面积从 0.036~332 m ² 不等的流域的 SDR 值变化于 0.07~0.59 之间	S. B. Maner ^[22]
美国南部乔治亚州沿岸平原农业区小流域	依据 1974—1976 年 3 a 共计 28 个月的逐月输沙量数据、及 USLE 计算的总侵蚀量,得到逐月的泥沙输移比;再把全年分成 4 个季度,比较泥沙输移比季节间的变化情况	SDR 月值为 0.002~0.446,季度值为 0.003~0.163,年值为 0.045(1975)年和 0.055(1976 年),小流域(17.36 km ²)年平均值为 0.05	J. M. Sheridan 等 ^[59]
卢森堡 Schronde-weilerbaach 流域	通过沙量概算的方法测算沟坡及河道各类侵蚀过程的总侵蚀量,并结合水库调查确定淤积量,计算泥沙输移比;考虑的侵蚀过程包括雨滴溅蚀、壤中流、蠕变、冲蚀淘刷、堤岸坍塌	夏季时 SDR 值在 100%~350%之间,冬季时 SDR 值在 25%~50%之间	J. J. H. M. Duijsings ^[60]
美国纽约 Little Beaver Kill 地区	采用基于 GIS 的分布式泥沙输移比评估模型—SEDMOD 计算泥沙输移比;数字高程模型来源于 USGS,土壤调查数据来源于 USDA,土地利用/覆盖数据来源于遥感图像	在面积为 43 km ² 的流域内,SDR 值变化范围为 0.06~0.47,平均 0.24	R. H. Fraser 等 ^[62]
尼日利亚西南部 Opa 流域	通过 SPOT 影像解译出各流域的土地利用情况,利用调查的水库淤积量作为侵蚀量,结合实测把口站输沙量计算不同土地利用情况下的泥沙输移比	建筑用地为主的流域平均为 0.712;农耕地和种植可可为主的流域分别为 0.493 和 0.422	A. Adediji ^[61]
澳大利亚 Murray Darling 流域	应用文献[32]中的概念模型,以泥沙输移至最近河道的时间和沟道中的流速为出发点,利用流域泥沙滞留时间与平均有效降雨持续时间的比值来表征泥沙输移过程。其中,泥沙滞留时间是粒径大小和水流质点输移时间的函数,在 GIS 支持下通过提取土壤、植被、地形和土地利用特征数据得到;降雨强度和降雨有效持续时间从 195 个自记雨量计站点中得到	泥沙输移比的变化范围为从河漫滩附近的接近于 0 到东部山区流域的 0.7	Lu. H 等 ^[63]

3 讨论

1) 对于土壤侵蚀量的获取。目前除坡面小区和沟道小流域(单元小流域)能够监测获得土壤侵蚀量外,整个流域面上的侵蚀信息不易采集到^[64],而是借助模型法或用输沙量替代来实现。对于径流小区的实测资料,在计算不同土地利用方式下坡面泥沙输移比时被作为输沙量,而在计算小流域泥沙输移比时则被用于土壤侵蚀量;但小流域出口的测验资料显示,在计算小流域泥沙输移比时作为输沙量,在计算大中流域时被作为土壤侵蚀量对待。地球化学法一般用于小流域不同土地利用与地形部位的土壤侵蚀量估算,但不太适合大区域^[65]。采用遥感技

术量算不同级别侵蚀强度面积来计算年平均侵蚀量,虽然可以用来研究大区域的平均泥沙输移比,但就当前土壤侵蚀研究的科学技术水平和研究现状,还不可能获取到大范围科学性很强的不同等级的土壤侵蚀面积,遥感调查结果的精度和可信度还存在争议。模型法中土壤侵蚀模型的选取及适用范围限制了其在泥沙输移比研究中的应用,即使是美国的通用土壤流失方程 USLE^[66]与水蚀预报模型 WEPP^[67]。目前土壤侵蚀量的获取多是研究者根据自己具有的研究手段与占有资料的情况来测算,从而出现研究结果差异大且应用价值小的局面。这主要是由于不同空间尺度用于泥沙输移比计算的土壤侵蚀量与输沙量的界定尚不清楚,也就是说坡面、小

流域、大流域、区域等空间尺度的土壤侵蚀量与输沙量如何界定,是目前需要重视和讨论的问题。另外,还需加强坡面与小流域的土壤侵蚀监测,并促进大流域与区域土壤侵蚀预报模型的研发。同时,如何从小尺度研究中得到的侵蚀量向大尺度流域转换的问题,这是大流域泥沙输移比计算中需要解决的问题。

2) 对于泥沙输移比模型。关于因子经验模型,由泥沙输移比影响因素通过相关分析建立的经验计算方程,是依据某一地区统计资料建立的,应用的局限性很大,且不能充分反映各特征参数或影响因素对泥沙输移比的综合影响及它们之间的物理本质;因此,在建立泥沙输移比经验模型时,可借鉴 RUSLE,尽可能地将影响土壤侵蚀和泥沙输移的主要因子考虑在内,既可避免估算的片面性,又可增强模型的外延性。目前分布式泥沙输移比模型的研究只是在中小流域上进行,应用到较大流域或区域时的精度还有待研究;模型在进行地块单元划分时只考虑坡面的侵蚀过程,没有考虑河道中泥沙的侵蚀和堆积过程;模型在验证 SDR 值的过程中又回到产沙量和侵蚀量的计算上来,且仍带有经验模型的特点。泥沙输移比物理模型主要通过数学方程和比较严格的数值解法,来描述流域土壤侵蚀产沙的物理过程与水沙运动过程,考虑了土壤侵蚀中土壤颗粒分离、泥沙输移和沉积 3 大过程及影响它们的水动力学条件,使得模型基本可以在其他地区推广应用,但模型的输入参数较难获取。目前泥沙输移比物理模型的研究处于初始阶段,应是今后努力的方向。

3) 关于泥沙输移比研究成果。我国泥沙输移比的研究主要集中于黄土高原与长江上中游地区、以及黄河与长江下游的排沙比研究,在我国其他流域及地区还不多见,需要加强东北黑土区、北方土石山区、南方红壤区、西南喀斯特地区的研究。黄土高原泥沙输移比的研究,由于受土壤侵蚀实测资料的限制,主要集中于有径流小区、小流域观测资料的地区,特别是无定河的大理河流域,这是由于岔巴沟流域具有非常好的径流小区和沟道系列观测资料而得到了较为深入的研究,而对其他区域的涉及不够;所以,目前的研究成果还不能反映黄土高原不同侵蚀环境条件下及大规模水土流失治理下的泥沙输移特征。另外,由于多数学者已经公认黄土高原的泥沙输移比接近 1 并得以应用,限制了泥沙输移比的进一步深入研究。对于长江上游地区,由于研究技术手段的多样,SDR 值的差异比较大,如对于长江上游

区域就有 SDR 值远小于 1 (0.07 ~ 0.66)^[68-69]和超过 0.7^[52]的结论;不同支流研究结果泥沙输移比为 0.042 ~ 0.61^[16];不同小流域(小于 300 km²) SDR 值为 0.23 ~ 1.0^[10,31,55]。坡面的研究只有岷江上游的黑水流域和镇江关流域不同土地覆被类型下的 SDR 值,为 0.009 ~ 0.207^[29]。这些研究成果的应用价值值得讨论,如文献[16]和[51]利用遥感技术根据不同等级土壤侵蚀面积获取侵蚀量,结合输沙量计算 SDR 值,但目前遥感调查结果的精度和可信度还存在争议;文献[55]利用 DEM 法测算沟谷的盆腔体积,结合流域内松散堆积物体积得到流域的自然 SDR 值是接近 1,但由于选择的时间尺度太长,以兆年为单位,流域的侵蚀、产沙、输移系统必然处于平衡状态,结论具有科学价值但不具有现时应用价值。

4) 需进一步探讨的问题。一是泥沙输移比的上限问题。在黄土高原地区的研究结果中,不同次降雨条件下、不同年份和多年平均的 SDR 值都有大于 1 的情况,在长江上游地区的研究结果则中没有出现,而黄河下游河道和长江下游洞庭湖的排沙比有大于 1 的情况。依据定义,流域的输沙量与侵蚀量的比值即 SDR 值应该是小于等于 1 的,出现大于 1 的情况是由于本次时段输沙量的计算中累计了前期时段的泥沙淤积量,并不是严格定义上的泥沙输移比。问题的关键在于实际计算时无法将本次计算时段的输沙量与前期的泥沙淤积量分离,目前的观测数据不能提供这样的支持,应规范不同时间尺度下的泥沙输移比的取值。二是泥沙输移比与面积的关系问题。多数学者的研究结论是泥沙输移比与流域面积成反比关系,在长江上游地区、燕山地区有研究显示出反比关系,但在黄土高原地区的研究结果中却没有反比关系,景可等目前正在赣江流域的研究表明泥沙输移比随流域面积的变化是无序的,它们之间也并不存在一个绝对的反比关系。影响流域泥沙输移比的主要因素是侵蚀产沙类型、河谷形态与河床纵比降、下垫面条件、水文气候条件及人为因素,而这些影响因素中没有一个是与流域面积大小发生关系的。虽然流域的大小隐含着下垫面空间变化的复杂性,但这些从流域面积大小的数据上是反映不出来的;因此,流域面积不是决定泥沙输移比的关键因素,需要结合其他影响因子加以综合分析。三是泥沙输移粒径问题。影响泥沙输移比大小的侵蚀物质特征主要是泥沙的粒径,且侵蚀泥沙的特征同泥沙的来源地关系密切,最大粒径与最小粒径可相差百万倍,其体积差值则用亿倍计。D. E.

Walling^[70]在假设输移的泥沙中全部黏粒级粒子不发生沉积的情况下,提出了用输移泥沙中黏土颗粒含量与土壤中黏土颗粒含量之比计算泥沙输移比。单从土壤粒级分类角度看,该公式的推广就受到限制,且未考虑到不同地区侵蚀产沙的特点,仅用黏粒级来划分计算泥沙输移比是不全面的。不同地区、不同河流乃至不同河道内泥沙粒径大小的分布范围都会有所不同,粒级组成受包括上游流域地质地貌、土壤类别、水量丰沛程度、人类活动在内的众多因素的影响,如景可^[52]在黄河中游和长江三峡定义的计算泥沙输移比的最大粒级上限分别为 1.0 和 2.0 mm:因此,需要加强研究不同侵蚀类型区各粒径泥沙的输移特征,完善泥沙输移比的定义。

总之,我国泥沙输移比的研究,在空间尺度上涉及坡面、小流域、支流、大流域/区域、河道、入海口,在时间尺度上表现为次降雨、年度、多年平均的泥沙输移比,但不管在研究成果集中的黄河流域,还是长江流域都不完整,而且由于研究方法不同、数据的限制、以及尺度界定不清等原因,大部分研究成果缺乏实际应用价值,处于探索性阶段;因此,建议以后的研究从流域侵蚀产沙过程入手,结合径流小区资料、流域监测资料及水文测验资料,从侵蚀产生的坡面开始,经过沟道、小流域、大流域/集水区、水库湖泊、河道、河口,界定计算不同时空尺度的泥沙输移比,并结合自然和人为因素分析比较泥沙输移比沿程的变化情况及原因,把侵蚀产沙、泥沙输移和泥沙沉积有机的联系起来,为分析不同尺度的土壤侵蚀量及其对河流冲淤状况的影响,及利用河流输沙量推算不同尺度实际侵蚀产沙量提供支持,推动土壤侵蚀与水土保持学科的发展。

4 参考文献

- [1] 水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册. 北京:中国环境科学出版社,1989:27-28
- [2] Vanoni V A. Sedimentation Engineering. New York: The Society, 1975:437-493
- [3] 景可,陈永宗,李风新. 黄河泥沙与环境. 北京:科学出版社,1993:138-141
- [4] 蔡强国,范昊明. 泥沙输移比影响因子及其关系模型研究现状与评述. 地理科学进展,2004,23(5):1-9
- [5] 王协康,敖汝庄,喻国良,等. 泥沙输移比问题的分析研究. 四川水力发电,1999,18(2):16-20
- [6] 张凤洲. 谈泥沙输移比. 中国水土保持,1993(10):17-18
- [7] 李智广,刘秉正. 我国主要江河流域土壤侵蚀量测算. 中国水土保持科学,2006,4(2):1-6
- [8] 水利部水土保持司. SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准. 北京:中国水利水电出版社,2007
- [9] 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
- [10] 文安邦,张信宝,王玉宽,等. 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
- [11] Maner S B. Factors influencing sediment delivery ratios in the Blackland Prairie land resource area. Fort Worth, Tex: U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1962:10-12
- [12] 马琨,王兆骞,陈欣,等. 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
- [13] 郑进军. 基于核素示踪技术和 WEPP 模型的侵蚀产沙评价研究[D]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,2007:76-79
- [14] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield computed with universal equation. Journal of the Hydraulics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1972, 98 (HY12):2087-2098
- [15] 花利忠. 基于 AnnAGNPS 模型的流域侵蚀产沙评价——以三峡库区大宁河流域为例[D]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,2007:85-86
- [16] 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
- [17] Renfro G W. Use of erosion equations and sediment-delivery ratios for predicting sediment yield. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. U. S. Dep. Agric, Publ, 1975:33-45
- [18] Haith D A, Tubbs L J. Watershed loading functions for non-point sources. Journal of the Environmental Engineering Division, 1981, 107(1):121-137
- [19] Mutchler C K, Bowie A J. Effect of Land Use on Sediment Delivery Ratios. Proceedings of the Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Washington D C, 1976:1-11—11-21
- [20] 蔡强国,陈浩,马绍嘉,等. 黄土丘陵沟壑区羊道沟小流域次降雨泥沙输移比研究. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集. 北京:地质出版社,1991:105-113
- [21] Mou J, Meng Q. Sediment delivery ratio as used in the computation of watershed sediment yield. Journal of Hydrology (New Zealand), 1981, 20(1):27-38
- [22] Maner S B. Factors affecting sediment delivery ratios in the Red Hills physiographic area. Transactions of the American Geophysical Union, 1958, 39(4):669-675

- [23] Roehl J E. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. *International Association of Hydrology Science, Publ*, 1962, 59:202-213
- [24] Williams J R. Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. *Erosion and solid matter transport in inland waters. IAHS-AISH, Publ*, 1977, 122:168-179
- [25] 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
- [26] Ferro V, Porto P. Sediment delivery distributed (SEDD) model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2000, 5(4):411-422.
- [27] Fraser R H, Barten P K, Tomlin C D. SEDMOD: a GIS-based method for estimating distributed sediment delivery ratios. *Symposium on Geographic Information Systems and Water Resources, American Water Resources Association*, 1996:137-146
- [28] Lim K J, Sagong M, Engel B A, et al. GIS-based sediment assessment tool. *CATENA*, 2005, 64:61-80
- [29] 杨孟, 李秀珍, 胡远满, 等. 利用 SEDD 模型模拟岷江上游小流域的年产沙量. *应用生态学报*, 2007, 18(8):1758-1764
- [30] 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(6):85-90
- [31] 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, 1(6):12-20
- [32] Lu H, Moran C J, Prosser I P, et al. Modelling sediment delivery ratio based on physical principles. *Complexity and Integrated Resources Management, Transactions of the Second Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, Manno, Switzerland, vol. 3., iEMSs, 2004b: 1117-1122*
- [33] 许炯心. 黄河下游排沙比研究. *泥沙研究*, 1997(1):49-54
- [34] 许炯心. 黄河下游泥沙输移特征对入海泥沙通量的影响. *海洋与湖沼*, 2003, 34(6):664-670
- [35] 张世奇. 黄河口海洋动力输沙能力分析. *泥沙研究*, 2007(1):8-15
- [36] 龚时功, 熊贵枢. 黄河泥沙来源和地区分布. *人民黄河*, 1979, 1(1):7-17
- [37] 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
- [38] 景可. 黄土高原泥沙输移比的研究 陈永宗. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京:气象出版社, 1989:14-26
- [39] 曹文洪, 张启舜, 姜乃森. 黄土地区一次暴雨产沙数学模型的研究. *泥沙研究*, 1993(1):1-13
- [40] 刘黎明. 黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀泥沙输移比物理模型研究. *中国水土保持*, 1994(3):12-16
- [41] 景可. 泾河、北洛河泥沙输移规律. *人民黄河*, 1999, 21(12):18-19
- [42] 陈浩, 蔡强国, 陈金荣, 等. 黄土丘陵沟壑区人类活动对流域系统侵蚀、输移和沉积的影响. *地理研究*, 2001, 20(1):68-75
- [43] 许炯心, 孙季. 水土保持措施对流域泥沙输移比的影响. *水科学进展*, 2004, 15(1):29-34
- [44] 刘纪根, 蔡强国, 张平仓. 岔巴沟流域泥沙输移比时空分异特征及影响因素. *水土保持通报*, 2007, 27(5):6-10
- [45] 史德明. 长江流域土壤侵蚀特点及其潜在危险. *中国水土保持*, 1983(3):3-6
- [46] 史德明. 三峡库周地区土壤侵蚀对库区泥沙来源的影响及其对策 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组. 长江三峡工程对生态与环境的影响及其对策研究论文集. 北京:科学出版社, 1987:498-521
- [47] 许炯心. 三峡水库修建前长江宜昌—武汉段泥沙输移比及其影响因子. *山地学报*, 2008, 26(1):15-21
- [48] 王俊, 张欧阳, 熊明. 三峡水库首次蓄水对泥沙输移特性的影响. *水利发电学报*, 2007, 26(5):102-106
- [49] 黎昔春, 张水云. 洞庭湖的泥沙输移特性. *泥沙研究*, 2003(2):73-76
- [50] 张欧阳, 熊明. 洞庭湖排沙比变化及影响因素分析. *人民长江*, 2006, 37(12):117-119
- [51] 范建容, 钟祥浩, 刘淑珍. 嘉陵江中下游典型流域土壤侵蚀与泥沙输移遥感监测. *中国科学:E辑:技术科学*, 2003, 33(增刊):157-163
- [52] 景可. 长江上游泥沙输移比初探. *泥沙研究*, 2002(1):53-59
- [53] 袁再健, 褚英敏. 四川紫色土地区小流域次降雨泥沙输移比初探. *水土保持通报*, 2008, 28(2):36-40
- [54] 吴成基, 甘枝茂. 陕西河流泥沙输移比问题. *地理科学*, 1998, 18(1):39-44
- [55] 张信宝, 文安邦, 张云奇, 等. 川中丘陵区小流域自然侵蚀速率的初步研究. *水土保持学报*, 2006, 20(1):1-5
- [56] 高旭彪, 孙厚才, 赵永军, 等. 长江上游川中紫色土丘陵区小流域泥沙输移比空间尺度效应研究. *水土保持通报*, 2007, 27(6):130-133
- [57] 卢金发. 燕山地区流域侵蚀产沙与流域地质地貌的初步研究. *泥沙研究*, 1989(1):25-83
- [58] 郑添发, 黄炎和, 卢程隆, 等. 闽东南花岗岩侵蚀区土壤侵蚀规律与治理. 泥沙输移动态的研究. *福建农学院学报*, 1991, 20(2):196-199
- [59] Sheridan J M, Booram C V, Asmussen J R, et al. Sediment delivery ratios for a small coastal plain agricultural watershed. *Transactions of the ASAE*, 1982, 25(3):610-615

- [60] Duijsings J J H M. Seasonal variation in the sediment delivery ratio of a forested drainage basin in Luxembourg. Drainage basin sediment delivery. IAHS Publication, 1986:153-164
- [61] Adediji A, Jeje L K. Land use and sediment delivery ratio in the Opa Basin, southwestern Nigeria. Trop Agric, 2004, 81 (3):133-140
- [62] Fraser R H. SEDMOD: A GIS-based delivery model for diffuse source pollutants [D]. New Haven: Yale University, 1999:77-89
- [63] Lu H, Moran C J, Prosser I P. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. Environmental Modelling & Software, 2006, 21:1297-1308
- [64] 景可, 王万忠, 郑粉莉. 中国土壤侵蚀与环境. 北京: 科学出版社, 2005:227-267
- [65] 唐小明, 李长安. 土壤侵蚀速率研究方法综述. 地球科学进展, 1999, 14(3):274-278
- [66] Kinnell P I A. Sediment delivery ratios: a misaligned approach to determining sediment delivery from hillslopes. Hydrological Processes, 2004, 18(16):3191-3194
- [67] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process based soil erosion model for USDA water erosion prediction project technology. Trans Am Soc Civ Eng, 1989, 32(5):1587-1593
- [68] 余剑如. 长江上游地面侵蚀与河流泥沙问题的探讨. 人民长江, 1987, 18(9):21-29
- [69] 张信宝, 柴宗新. 长江上游水土流失治理的思考. 水土保持科技情报, 1996(4):7-9
- [70] Walling D E. The sediment delivery problem. Journal of Hydrology, 1983, 65(1-3):209-237

(责任编辑:程云)

(上接第 112 页)

因是高出地面的嵌草及地面低洼处的水坑阻挡了地表径流;试验场出口径流过程曲线有波动,造成这种现象的主要原因是流场中嵌草的起伏和摆动。

3) 当地表充分湿润、降雨强度为 1.19 mm/min 时,研究中的嵌草砖铺装路面的渗流率约为 0.42。

4 参考文献

- [1] Schlüer W, Jefferies C. Modelling the outflow from a porous pavement. Urban Water, 2002, 4: 245-253
- [2] Ragab R, Rosier P, Dixon A, et al. Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation. Hydrological Processes, 2003, 17: 2423-2437
- [3] 张文静,丁跃元,张书函. 混凝土透水砖透水持久性的研究. 砖瓦,2006(7):16-17
- [4] 徐向舟,刘大庆,张红武,等. 室内人工模拟降雨试验研究. 北京林业大学学报,2006,28(5):65-71
- [5] 武晟,汪志荣,张建丰,等. 不同下垫面径流系数与雨强及历时关系的实验研究. 中国农业大学学报,2006,11(5):55-59
- [6] 陈礼. 城市透水面集水效应现场试验系统设计[D]. 大连:大连理工大学土木水利学院,2008

(责任编辑:宋如华)