

径流小区法监测水土流失的百年历程(1915—2014 年)

李 月^{1,2}, 周运超^{1,2}, 白晓永^{2,3}, 秦罗义^{2,3}, 李盼龙^{2,3}, 罗光杰^{2,3}, 张斯屿^{2,3}

(1. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550000;

2. 中国科学院 普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100;

3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

[关键词] 径流小区; 水土流失; 研究进展; 发展历程

[摘要] 采用文献调查法对 100 年来径流小区法在国内外的研究进展进行了系统分析与归纳总结, 探讨了径流小区法在水土流失监测领域的发展历程及其在土壤侵蚀规律研究中发挥的作用。结果表明: 在时间上, 径流小区法经历了个体探索、群体研究、发展壮大、成熟完善与多学科交叉应用等 4 个阶段; 内容上, 经历了从监测单一水土流失速率到监测坡面营养元素变化、碳循环、反演复杂坡面景观变化的过程; 方法上, 呈现由以定位观测为主的现状描述到以动态实时观测为主的模型构建的特点; 精度上, 经历了由粗略统计到精确量化的变化过程。径流小区法为揭示水土流失规律、促进土壤侵蚀监测方法和技术的发展奠定了坚实的基础, 在水土流失过程监测中发挥的作用不可替代。

[中图分类号] S157 [文献标识码] A [文章编号] 1000-0941(2014)12-0063-04

水土流失是导致生态环境恶化和土地生产力下降的主要原因之一^[1-2]。作为一项重要的水土保持基础性工作, 水土流失监测在实践中逐渐发展起来^[3], 成为土壤侵蚀研究的经典方法。径流小区法是对坡地和小流域水土流失规律进行定量研究的一种重要方法, 自 1915 年诞生到 2014 年正好是 100 年。径流小区法在水土保持监测、科研、示范、推广等方面做出的巨大贡献和发挥的重要作用有目共睹, 随着应用领域的扩展和科学技术的进步, 径流小区法的监测设备、技术和方法都有了长足进步, 有力地促进了水土保持理论、技术、措施和政策的发展^[3], 同时径流小区法也成为从微观尺度上研究和探索水土流失规律最有效的方法之一^[4-6]。因此, 系统了解径流小区法在土壤侵蚀监测研究中的技术更新及发展历程, 对总结和创新水土流失观测与评价方法有着重要的意义。

1 个体探索阶段(1915—1940 年)

径流小区试验法最初是由美国密苏里农业试验站的 Miller 及其同事于 1915 年基于开展农作物种植及轮作措施对土壤侵蚀和产流的影响研究而创建的^[7], 作为观测试验的重要手段之一, 设置的小区长 27.66

m、宽 1.83 m, 并于 1923 年第一次出版了野外试验小区成果, 自此水土保持地面观测有了特有的方法^[8]。我国首次应用径流小区法是在 1922—1927 年, 由南京金陵大学森林系美籍教授 Lowermilk 博士在一般性考察的基础上, 会同助教任承统、李德毅、沈学礼等, 在山西沁源、宁武和山东青岛林场建立了径流小区, 以观测不同森林植被对水土流失的影响, 实现了水土流失定量化研究^[9], 并根据试验资料发表了《影响地表径流和面蚀的因素》, 这标志着我国采用径流小区观测方法研究坡地水土流失规律的开始。径流小区法水土流失量的计算公式为: $S_t = \gamma_s Sh_s (1 - W_w)$ (其中: S_t 为小区侵蚀泥沙总量; γ_s 为侵蚀泥沙容重; S 为蓄水池底面积; h_s 为沉积泥沙的平均厚度; W_w 为沉积泥沙含水量)。1936 年, Cook 通过对大量径流小区的分析, 提出影响土壤侵蚀的三大因子^[10]分别为土壤可蚀性、降雨侵蚀力、植被覆盖性, 为土壤侵蚀预报技术发展提供了思路, 也为后续研究工作奠定了基础。

在该阶段, 采用径流小区法比较容易掌握坡度、植被、土壤质地等数据^[3], 能区分各种径流条件, 有利于研究单项水土保持措施对水土流失的影响。但是在某些情况下, 采用一种方法往往不能获得准确的监测数据, 尤其是径流小区法无法提供较长时期的土壤侵蚀数据且具有劳动强度大的缺点^[11-12], 因此限制了其在土壤侵蚀过程研究中的应用。

2 群体研究阶段(1940—1960 年)

在 20 多年的个体探索发展阶段后, 径流小区法得

[基金项目] 国家“973”项目(2013CB956704); 国家科技支撑计划(2014BAB03B02); 贵阳市科技局项目(筑合同[2012]205号); 贵州省科技计划(黔科合重大专项字[2012]6015号); 贵州省农业攻关项目(黔科合 NY[2014]3039 号); “西部之光”之西部博士专项(科发人教字[2012]179 号)

到了更多学者的关注和应用。1940 年 Zingg 应用径流小区的模拟阵雨和野外条件研究了坡长、坡度与修筑梯田之间的关系,把土壤流失速率和坡度、坡长联系起来^[13]。1941 年,Smith 在此基础上,增加了水土保持措施因子和作物因子,为通用土壤流失方程的建立奠定了基础^[14]。1942 年,旧中国农林部在水天建立了水土保持实验区,通过径流泥沙观测开展了水土流失规律研究^[3]。1952 年,黄河水利委员会建立了西峰水土保持试验站,根据黄土高原沟壑区水土保持工作需求,参考径流小区观测数据开展了水土保持试验研究^[15]。1958 年,长江流域规划办公室为观测研究暴雨径流关系、人类活动对降雨径流的影响及降雨径流形成的物理过程,在唐河建成祁仪径流实验站^[16]。

在该阶段,为适应不同试验目的和要求,研究人员对径流小区法的观测手段和设备进行了改进,将径流小区法作为探索坡面水土流失规律的桥梁,为土壤侵蚀观测和水土保持研究提供了数据支撑,对探索水土流失的发生发展规律发挥了积极的作用。

3 发展壮大阶段(1960—2000 年)

20 世纪中期,径流小区法逐步进入发展壮大时期,大大促进了人们对水土流失和土壤侵蚀规律的认识和理解。1971 和 1978 年,美国学者 Wischmeier 和 Smith 对 65 000 场暴雨条件下 8 250 个侵蚀小区和 2 500 条小流域 1 年的观测数据进行了分析,提出了经验性的通用土壤流失方程(USLE)^[17]—— $A = RKLSCP$ (其中: A 为单位面积土壤流失量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为作物覆盖和管理因子; P 为水保措施因子)。1973 年中国科学院水土保持研究所纸坊沟小流域为试验区,开展了较为系统的水土流失定位监测。目前,该试验区已成为“中国生态研究网络”农田生态系统站——安塞水土保持综合试验站,建成了完整的水土流失监测和山地综合实验场^[3],建设各种径流小区 160 多个,可以开展不同坡地、坡度、坡型的水土流失规律模拟试验,评估不同植被类型的水土保持效益,监测农、林、草地土壤生物量、含水量及养分平衡等。国家计划委员会在 1986—1990 年建立了 11 个综合试验示范区,在此基础上开展了体系化的小流域土壤流失监测与坡地保护、农业生产、经济发展等示范研究。随着研究的逐步深入,郑粉莉等(1994 年)通过对在子午岭林区中未开垦、开垦后土地上布设的标准小区及大型坡面径流场测定的径流、泥沙资料进行对比分析,提出在非林地的坡面上用标准小区观测资料建立的坡面土壤流失方程有局限性^[18],另根据大型坡面径流场、

标准小区和小流域把口站测定的径流量、泥沙量资料,认为利用标准小区法测定的非林地泥沙量可以作为小流域把口站输沙量的参考值,而利用大型坡面径流场测定的林地与非林地泥沙量的比值可作为相似条件下小流域或林区与非林区泥沙量的比值。20 世纪 90 年代末,陈淑华在闽东地区设计了 6 个不同处理径流小区对茶园的水土流失进行观测^[19],结果显示实施坡改梯+生物覆盖的处理与传统台地耕作处理相比,土壤侵蚀量有明显减少,土壤含水量也有所增加。

在该阶段,通过建立径流小区开展了大量的试验和监测,分析了降雨、径流、土壤侵蚀等之间的物理关系和影响机制,提出了土壤侵蚀预报模型的雏形,方法上呈现由以定位观测为主的现状描述到以动态实时观测为主的模型构建的变化趋势,有助于把握坡面土壤侵蚀的演变过程,研究和计算水土保持单项措施对水土流失的影响及其减水减沙、保水保土效益^[20-21],推动了土壤侵蚀研究和地面监测技术方法的进展,为实现水土流失综合治理和制定相关水土保持措施提供了依据,基本确定了土壤侵蚀过程研究及水土流失规律监测的大体方向。

4 成熟完善与多学科交叉应用阶段(2000 年至今)

进入 21 世纪后,径流小区法在被广泛应用的同时,也迎来了新的发展机遇和挑战。李洪勋等(2006 年)用径流小区法研究了不同耕作措施对土壤侵蚀的影响^[22],结果表明沿等高线+薄膜覆盖+秸秆覆盖+开沟种植能有效减少土壤侵蚀,保护土壤耕作层,促进农业的可持续发展。陈安强等(2007 年)以土石山区径流小区的径流量和侵蚀量为研究对象,根据山东省临朐县辛庄试验站坡长 10、20、40 m 的径流小区多年观测资料,分析了坡长与径流、侵蚀的关系^[23]。随后,彭韬等(2008 年)通过对喀斯特坡地 6 种不同土地利用方式下径流小区的地表径流、植被穿透雨量及地下水出口水位变化进行野外定点连续观测^[24],结果表明 6 个径流小区地表径流系数均非常小,介于 0.01%~12.81% 之间,喀斯特坡地的地表径流容易入渗转为地下径流,尤其是受人为活动影响较大的径流小区,地表径流系数随降雨量的变化呈指数函数型变化特征,容易产生地表径流系数突变式增长。顾再柯等(2008 年)分析了贵州省水土保持监测网络与信息系统一期工程建成的 8 个监测点的坡面径流小区在运行观测中存在的问题,总结了监测点径流小区建设在布局、设计和施工中存在的不足^[25]。林军等(2009 年)通过对北方土石山区不同坡长的径流小区进行径流量和侵蚀量的观测^[26],分析了不同条件下径流小区降雨产生的径

流量、侵蚀量及其变化规律,并为土壤可蚀性计算提供了数据支持。廖伟等(2010年)以丹江口库区郧西县坡面径流小区为试验点,通过分析各小区的观测数据^[27],筛选了坡面土壤侵蚀定性评价与定量预测指标体系,利用郧西县径流小区的土壤侵蚀样本验证了两种模型在该地区坡面径流小区定性评价与定量预测中的可行性。甄宝艳等(2010年)通过对桃林口水库大暖泉径流小区产流次数、冲刷量、径流深、植被覆盖等指标的监测及分析^[4],得出随着植被盖度的增加产流次数与径流量趋于减少的结论。唐有臻(2012年)以前陡小流域为例,对水土保持监测径流小区设计及相

关计算进行了研究^[28]。谢颂华等(2013年)以江西水土保持生态科技园径流小区为例,对径流小区主体部分进行优化设计^[29],提出了径流小区设计中应把握的原则。

径流小区法经过了长期的发展,技术方法逐渐趋于成熟,由粗略统计到精确定量化,学科交叉性逐步增强,涉及领域逐步扩展,在水土流失监测、坡面土壤侵蚀定性定量评价、水土保持措施制定等方面发挥了重要作用,促进了土壤侵蚀和水土流失监测技术、方法的发展。

表1 径流小区法百年发展历程

发展阶段	时间	代表作者/单位	主要地点	主要贡献	局限性
个体探索阶段	1915—1940年	Miller ^[7] ,任承统、李德毅、沈学礼 ^[9] ,Cook ^[10]	美国密苏里农业试验站,中国山西沁源、宁武和山东青岛林场	径流小区观测和水土流失定量化研究的萌芽时期,为后续的土壤侵蚀现状观测及水土流失监测研究奠定了基础	无法提供较长时期的土壤侵蚀数据,难以监测大范围空间的土壤侵蚀变化
群体研究阶段	1940—1960年	Zingg ^[13] ,Smith ^[14] ,旧中国农林部 ^[3] ,黄河水利委员会 ^[15]	天水水土保持科学试验站,美国西部爱达荷州林业局	作为探索坡面水土流失规律的桥梁,径流小区法为土壤侵蚀现状观测和水土保持研究提供大量基础资料,观测手段和设备有了一定的改善	难以应用于土壤迁移的空间分配研究
发展壮大阶段	1960—2000年	Wischmeier等 ^[17] ,中国科学院水土保持研究所,国家发展计划委员会,郑粉莉等 ^[18] ,陈淑华 ^[19]	纸坊沟小流域,安塞水土保持综合试验站,子午岭林区,闽东地区	开展了大量试验和监测,水土流失地面监测水平有了明显提升,提出了土壤侵蚀预报模型的雏形,可以进一步把握坡面土壤侵蚀演变过程,为强化水土流失综合治理及合理布设水土流失防治措施体系提供了依据	径流小区的汇水条件与天然坡面存在差异,测定的侵蚀量数据可靠性无法保证
成熟完善与多学科交叉应用阶段	2000年至今	李洪勋等 ^[22] ,陈安强等 ^[23] ,彭韬等 ^[24] ,顾再柯等 ^[25] ,林军等 ^[26] ,廖伟等 ^[27] ,甄宝艳等 ^[4] ,唐有臻 ^[28] ,谢颂华等 ^[29]	山东省临朐县辛庄试验站,喀斯特坡地,贵州省坡面径流小区,北方土石山区,丹江口库区郧西县,桃林口水库,江西水土保持生态科技园	径流小区技术方法逐渐趋于成熟、稳定,坡面土壤侵蚀监测工作效率提高,多领域、多学科的相互交叉渗透及各种方法的优势互补有效促进了各类监测方法的发展和创新	科技含量、测量精度方面有待提高,监测手段制约了地面监测水平的发展,技术方法的发展滞后于实践

5 结 语

纵观径流小区法在水土流失监测应用中的百年发展历程可以发现:在时间上,经历了个体探索、群体研究、发展壮大、成熟完善与多学科交叉等4个阶段;内容上,经历了从监测单一水土流失速率到监测坡面营养元素变化、碳循环,甚至反演复杂坡面景观变化的过程;方法上,呈现由定位观测为主的现状描述到以动态适时观测为主的模型构建的特点;精度上,经历了由粗略统计到精确定量化的变化过程。径流小区法为深入揭示水土流失规律,促进土壤侵蚀监测方法和技术的发展奠定了基础,在水土流失监测过程中发挥的作用无可替代。

[参考文献]

- [1] 王礼先,朱金兆.水土保持学[M].北京:中国林业出版社,1995:185-186.
 [2] 杨吉华.水土保持原理与综合治理[M].济南:山东科学技

术出版社,1993:224-225.

- [3] 郭索彦,李智广.我国水土保持监测的发展历程与成就[J].中国水土保持科学,2009,7(5):19-24.
 [4] 甄宝艳,张卫平,邓春芳,等.桃林口水库不同径流小区水土流失规律研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(2):57-60,65.
 [5] 王侨,何丙辉,许红艳,等.不同种植模式下地表径流污染的空间分布特征[J].水土保持学报,2008,22(6):25-29.
 [6] 刘方,黄昌勇,何腾兵,等.黄壤旱坡地梯化对土壤磷素流失的影响[J].水土保持学报,2001,15(4):75-78.
 [7] 宋颖.土壤侵蚀模型研究进展及发展方向[J].山西水利科技,2006(3):39-41.
 [8] 张晓艳.保护性耕作条件下土壤物理性状及土壤侵蚀研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
 [9] 梅子红了.中国水文大事记[EB/OL].http://www.chinacitywater.org/bbs/viewthread.php?action=printable&tid=43616,2007-07-01.
 [10] 符素华,刘宝元.土壤侵蚀量预报模型研究进展[J].地球科学进展,2002,17(1):78-84.
 [11] 唐翔宇,杨浩,赵其国,等.¹³⁷Cs示踪技术在土壤侵蚀估算

中的应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(5): 576-582.

[12] 吴普特, 周佩华, 郑世清. 黄土丘陵沟壑区(Ⅲ)土壤抗冲性研究——以天水站为例[J]. 水土保持学报, 1993, 3(7): 19-25.

[13] 张振龙. 基于遥感和 GIS 的汉江上游植被与土壤侵蚀的动态监测研究——以湖北郧县若干小流域为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2006: 2-3.

[14] 张亚玲. 基于 GIS 的黄河中游水沙模型研究——以天水罗玉沟流域为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2008: 15-16.

[15] 刘平乐. 黄土高原沟壑区水土流失原型观测站网建设现状[J]. 中国水土保持, 2005(12): 12-13.

[16] 葛维亚. 我国水文实验简史记述[EB/OL]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_530b15330100jm2u.html, 2014-04-19.

[17] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains[M]. Washington DC: USDA, ARS, Agriculture Handbook, 1965.

[18] 郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 林地开垦后坡沟侵蚀产沙关系的研究[J]. 中国水土保持, 1994(8): 19-20, 61-62.

[19] 陈淑华. 闽东茶园径流小区试验与水土保持措施的探讨[J]. 福建水土保持, 1999, 11(4): 52-55.

[20] 张明波, 郭海晋. 水土保持措施减水减沙研究概述[J]. 人民长江, 1999(3): 47-49.

[21] 罗海波, 钱晓刚, 刘方, 等. 喀斯特山区退耕还林(草)保持水土生态效益研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4):

31-34, 41.

[22] 李洪勋, 吴伯志. 用径流小区法研究不同耕作措施对土壤侵蚀的影响[J]. 土壤, 2006, 38(1): 81-85.

[23] 陈安强, 马文贵, 高福军, 等. 土石山区径流小区坡长对径流量和侵蚀量影响的研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 190-193, 196.

[24] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 125-129.

[25] 顾再柯, 刘凤仙. 贵州省水土保持监测点径流小区存在问题与优化对策[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 18-20.

[26] 林军, 倪伟, 宋传松, 等. 北方土石山区不同坡长径流小区水土流失规律研究[J]. 水土保持应用技术, 2009(3): 7-9.

[27] 廖炜, 孙燕, 张秋文, 等. 基于数量化理论 II 的鄂西北山区坡面土壤侵蚀强度评价——以郧西县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(4): 482-488.

[28] 唐有臻. 水土保持监测径流小区设计及相关计算探析[J]. 水土保持应用技术, 2012(4): 15-17.

[29] 谢颂华, 方少文, 王农. 水土保持试验径流小区设计探讨[J]. 人民长江, 2013, 44(17): 83-86, 113.

[作者简介] 李月(1991—), 女, 贵州贵阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持; 通信作者白晓永(1978—), 男, 河北石家庄市人, 副研究员, 博士, 主要研究方向为岩溶环境与水土保持.

[收稿日期] 2014-06-01
(责任编辑 李杨杨)

(上接第 59 页)

表 1 不同粒径小团聚体的容重和孔隙度

土样	粒级 (mm)	容重(g/cm ³)		孔隙度(%)	
		平均值	标准差	平均值	标准差
Q1	7—5	1.45	0.05	45.44	1.85
	5—2	1.45	0.14	45.26	5.29
	2—1	1.01	0.16	61.93	6.04
	环刀法	1.27	0.06	52.07	2.26
Q2	7—5	1.53	0.03	42.16	1.12
	5—2	1.38	0.08	48.08	2.95
	2—1	1.03	0.27	61.31	10.29
	环刀法	1.34	0.02	49.43	0.75

粒径越小, 团聚体表面的石蜡越难以去除干净, 进而对实验结果的平行影响较大。对于 7—5 mm 粒径团聚体, Q1 孔隙度显著大于 Q2 ($p < 0.05$), 这主要是下层土壤结构更加紧实的缘故; 对于 5—2 mm 团聚体, Q1 孔隙度低于 Q2, 但是两者差异不显著; 对于 2—1 mm 团聚体, Q1 和 Q2 两者的孔隙度比较接近 ($p > 0.05$)。

3 结论

用蜡封—容量瓶法测定土壤团聚体孔隙度, 对实验装置要求简单, 测定结果精确, 而且操作简单易行, 因此该方法对于团聚体(尤其是 7—2 mm 粒径)孔隙

度的测定切实可行。

[参考文献]

[1] Brasher B R, Franzmeier D P, Valassis V, et al. Use of saran resin to coat natural soil clods for bulk density and water retention measurements[J]. Soil Science, 1996, 101(2): 108-109.

[2] 中科院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 91-95.

[3] Sarli G O, Filgueira R R, Gimenez D. Measurement of soil aggregate density by volume displacement in two non-mixing liquids[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(5): 1400-1403.

[4] 彭新华, 张斌, 李江涛, 等. 对多孔介质物体孔隙度—蜡封法改进的探讨——以土壤团聚体为例[J]. 土壤通报, 2003, 34(1): 19-20.

[5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 266-271.

[6] 张维. 不同粒径土壤团聚体中孔隙分布特征的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2009.

[作者简介] 吴新亮(1989—), 男, 河南鹤壁市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与农业生态.

[收稿日期] 2014-01-25
(责任编辑 徐素霞)