

雷达测雨及其在土壤侵蚀中的应用研究进展

田丹丹, 殷水清

(地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 高时空分辨率天气雷达测雨对于监测中小尺度降雨系统的演变及定量估测降雨分布有重要意义。将雷达降雨资料用于土壤侵蚀的相关研究在世界各地陆续开展。综述了雷达反射率因子反演降雨方法的国内外研究进展, 对比了我国不同地区雷达反射率因子(Z)反演降雨强度(I)的转换关系($Z = aI^b$), 梳理了雷达降雨场应用于土壤侵蚀经验和机理模型进行土壤侵蚀监测与评估的相关进展。结果表明: a 值变化于 10~400, b 值变化于 1.2~3.8, 且 a 和 b 之间存在显著的负相关关系; 西南地区 a 值是所有地区中最大的, 华东和华北地区 b 值较其他区域大; 积状云降雨与层状云和混合型降雨相比, a 值较大, b 值较小; 各地研究表明雷达数据的即时性和高时空分辨率能提高土壤侵蚀监测与评估的时效性和精度。最后, 对雷达降雨资料应用于土壤侵蚀模型的研究趋势进行了展望。

关键词: 雷达降雨; $Z-I$ 关系; 土壤侵蚀模型

中图分类号: P412.25; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0001-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.06.001

Advances in Radar Rainfall Measurement and Its Application in Soil Erosion

TIAN Dandan, YIN Shuiqing

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,

Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Radar rainfall measurement with high spatio-temporal resolutions are useful in monitoring the small and middle scale rainfall systems and estimating the precipitation intensity distribution. Research on the application of radar precipitation data in the soil erosion has been conducted all throughout the world during the past decades. This study reviewed references on the approaches for obtaining the rainfall intensity from the radar reflectivity factor, compared the conversion relationships ($Z = aI^b$) between radar reflectivity factor (Z) and precipitation intensity (I) in different regions of China, and summarized the progress of applying radar precipitation field data in the monitoring and assessment of soil erosion based on the empirical and physical models. Results indicated that a significant negative correlation were found between a and b , and the ranges of a and b varied from 10 to 400 and 1.2 to 3.8, respectively. Southwest China was characterized with the largest a . East China and North China had the greater b than the other regions. Compared with stratiform and convective-stratiform mixed precipitation, cumulus convective precipitation had the greater a and lower b . Various studies have showed that the real-time, high spatiotemporal resolution of radar data can increase the efficiency and accuracy of soil erosion monitoring and assessment. Finally, the application of radar rainfall data in soil erosion models was prospected.

Keywords: radar rainfall; $Z-I$ relationship; soil erosion model

天气雷达是探测降雨的重要手段,用于监测降雨系统的演变和定量估测降雨分布。专用于天气探测和研究的雷达于 20 世纪 50 年代从军用雷达改造而来,半个多世纪以来,天气雷达的功能从回波定位探测,逐步发展成定量探测回波强度、径向速度等云和降雨的参量^[1],这些参量可以反映大气中云雨粒子的

分布、数量和运动速度等,连续观测还能反映天气系统的生消演变。我国新一代天气雷达最短可以在 5 min 内完成一次多仰角扫描,在极坐标下,生成沿角度方向空间分辨率为 1° ,沿径向方向空间分辨率为 1 km 的反射率因子(Z)资料,与雨量站的观测资料相比,有更高的时空分辨率,不会遗漏一些中小尺度降

收稿日期:2019-05-22

资助项目:国家自然科学基金项目“基于环流分型的多站点日降水随机模拟”(41877068);地表过程与资源生态国家重点实验室项目(2017-FX-06(2))

第一作者:田丹丹(1994—),女,福建三明人,在读硕士研究生,主要从事降雨及其对土壤侵蚀的影响评价研究。E-mail: danple@mail.bnu.edu.cn

通信作者:殷水清(1980—),女,湖南宁乡人,副教授,博士生导师,主要从事气候/气候变化影响评价研究。E-mail: yinshuiqing@bnu.edu.cn

雨系统。在使用雷达资料估测降雨时,需要将雷达观测的电子信号转换为地面瞬时雨强,其转换关系与雨滴谱的分布有关。降雨类型和过程复杂多变,导致转换关系的参数复杂多变,并且雷达在观测和降雨转换过程中存在各类误差,比如:地物杂波、波束非正常传播、零度层亮带、水平风、雨量计与雷达反射率资料尺度匹配等问题,使得目前雷达降雨资料的误差较大,使用前需要进行精度评估和误差订正。

土壤侵蚀是指土壤颗粒在水力、风力、冻融或重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运的过程^[2]。雨滴击溅地表,径流冲刷表层土壤、母质及破碎基岩,会造成土壤颗粒及营养物质流失,产生水土流失、面源污染等生态环境问题。土壤侵蚀模型常用降雨侵蚀力因子(R)反映降雨引起土壤侵蚀的潜在能力。在通用土壤流失方程 USLE(Universal Soil Loss Equation)中, R 因子定义为年内侵蚀性降雨产生的次降雨动能和次最大 30 min 雨强的乘积 EI_{30} 指标的累加值。 EI_{30} 的准确估算需要断点雨强资料,通过虹吸式雨量计或者翻斗式雨量计观测得来。这类资料非常有限,常常通过建立常规降雨观测资料,如日、月、年降雨量估算 R 因子的方法对其进行估算^[3]。大部分土壤流失量仅由少数几场极端降雨导致,所以准确评估极端降雨事件导致的土壤流失量及其空间分布,成为一个至关重要的问题。影响次土壤侵蚀量的各个因子中,降雨侵蚀力因子的变化最大,其余侵蚀因子在各次降雨之间变化相对较小。因此,降雨侵蚀力因子成为评估极端次降雨事件导致土壤侵蚀量的最关键因子。有研究^[4]表明,站点常规降雨资料估算次降雨侵蚀力的精度有限,而且有常规降雨资料的站点空间密度仍然有限,对暴雨空间变异特征的表达明显不足。因此,探索高时空精度雷达降雨资料在土壤侵蚀监测和评估中的应用,尤其是极端次降雨事件导致的土壤侵蚀量及其空间分布,具有重要意义。

1 雷达反射率反演降雨基本方法

天气雷达接收气象目标物(云、雨等)的回波信号,反射率因子(Z)表征回波信号的强度,其空间分布可以反映降雨系统的强度和结构特征,用于反演降雨。最常用的雷达资料反演降雨方法为 1947 年 Marshall 等^[5]提出的指数型公式 $Z=aI^b$ 。该公式中的 a 、 b 值与雨滴谱分布有关,随季节、降雨类型和地点变化而变化,因此需要建立当地适用的 $Z-I$ 关系或者用当地雨量计校准。雷达估测降雨的统计方法大致可以分为:(1)基于当地历史资料建立反射率因子 Z 与雨强 I 的统计转换关系;(2)按某种 $Z-I$ 转换关系先得到雷达初始降雨场,再用雨量计实测资料校正初始降雨场。

1.1 $Z-I$ 关系统计法

1947 年,Marshall 等^[5]分别建立雨滴谱与 Z 和 I 的关系,在一定假设基础上,提出 $Z-I$ 的基本转换关系: $Z=aI^b$,使得雷达定量估测降雨的发展有了很大进步,后来许多转换关系都基于这个经典模型。我国天气雷达业务中采用美国 WSR-88D 系列雷达中温带地区的 $Z-I$ 经验关系: $Z=300I^{1.4}$ 。实际上,要确定参数 a 、 b 值,需要使用雨滴谱仪实时测定雨滴谱和雨滴下落末的速度。有研究^[6-7]表明,降雨发展中不同微物理过程,例如:蒸发、碰并增长等,对 a 、 b 取值有不同影响,同时,降雨是不均匀且随时间变化的,雨滴谱也随时间、空间和不同降雨类型改变^[8],导致在不同地点、不同降雨类型、甚至在同一地点同一场降雨的不同阶段 a 、 b 的取值可能都存在一定差异^[9-11]。因此,在使用统计 $Z-I$ 关系反演降雨时,有必要根据当地情况,获得合适的参数 a 、 b 值。

$Z-I$ 关系统计法可以分为:固定 $Z-I$ 法、动态 $Z-I$ 法以及分型 $Z-I$ 法等。其中,固定 $Z-I$ 法采用固定不变的参数值;分型 $Z-I$ 法将降雨分为不同类别,如按照降雨类型、地点、季节等分类,分别计算 a 、 b 值;动态 $Z-I$ 法使用降雨发生前一段时间的资料,频繁地建立 $Z-I$ 关系以适用正在发生的降雨。在统计关系建立的过程中,常用的方法包括 a 值平均法、最优化法、最小二乘法、概率配对法等,还有一些学者采用神经网络算法、遗传算法等^[12-13]。

国际上,众多研究发展不同的方法,确定经典 $Z-I$ 关系式的 2 个参数 a 和 b 。Smith^[14]提出用最优化方法确定 a 、 b 值,当误差判别函数最小时,即认为该参数为最优参数;Calheiros 等^[15]提出概率配对法,即在气候均匀区域,统计 Z 与 I 的概率分布,认为当大于等于某个雨强 I 的概率与大于等于某个反射率 Z 值的概率相等时, Z 值与 I 值互相对应,从气候的角度统计得到 $Z-I$ 关系;Rosenfeld 等^[16]用概率配对法和最小二乘法统计 a 和 b 值;Hasan 等^[17]提出非参数概率配对法生成雷达降雨场;Yu 等^[18]在水文中应用雷达降雨数据时,发现降雨量反演对 b 值不敏感,因此固定 b 值,调整 a 值,取得了较好的效果。此外,还有一些学者考虑到参数的变异性,采用分型或者动态拟合的方法统计 $Z-I$ 关系。Battan^[19]列出了不同降雨类型下 $Z-I$ 方程组;后来,Prat 等^[20]、Moreno 等^[10]、Fang 等^[21]皆考虑了降雨类型对参数的影响,通过分类统计有效地提高了雷达降雨的反演精度;Wu 等^[9]结合分类和动态 $Z-I$ 法,用降雨系统的高度对降雨类型进行分类,在此基础上实时调整参数。另一种常见分类方式考虑与雷达站的距离对雷达测量值的影响,按与雷达站的距离远近进行分类^[11,22]。

在国内,目前业务上使用固定参数估计降雨量,即: $Z=300I^{1.4}$ ^[23]。根据雷达测雨的原理,用统一的 a 、 b 值估计全国所有的降雨会带来很大误差。许多

学者利用雷达和雨量计资料在全国不同区域做了许多 $Z-I$ 关系的统计工作,表 1 总结了我国不同地区的研究结果。

表 1 我国不同地区 $Z-I$ 关系总结

地区	作者/年份	使用方法	结果
华东地区	戴铁丕等,1983 ^[24]	a 值平均法	a 取值范围为[285,310], b 取 1.25
	张培昌等,1992 ^[25]	最优化法	$a=220$, $b=2.0$ (混合型降雨)
	刘娟等,1999 ^[26]	最优化法	按反射率值分组: $\text{dBZ}<20$: $a=30$, $b=1.6$; $20\leq\text{dBZ}<30$: $a=20$, $b=3.8$; $30\leq\text{dBZ}<40$: $a=50$, $b=2.7$; $\text{dBZ}\geq 40$: $a=230$, $b=1.9$
	郑媛媛等,2003 ^[27]	最优化法、概率配对法	按计算单元到雷达中心距离分组: a 取值范围为[97.6,193.6]; b 取值范围为[1.83,2.84];概率配对法较最优化法对面雨量估测结果较好
	何宽科等,2007 ^[28]	最小二乘法	$a=70$, $b=1.38$ (台风天气)
	姚燕飞,2007 ^[29]	最优化法	整体优化: $a=83$, $b=1.6$;以 25dBZ 为分类阈值: $\text{dBZ}<25$: $a=129$, $b=2.6$; $\text{dBZ}\geq 25$: $a=82$, $b=1.6$;以 35dBZ 为分类阈值: $\text{dBZ}<35$: $a=101$, $b=1.6$; $\text{dBZ}\geq 35$: $a=39$, $b=1.8$
华北地区	勾亚彬等,2014 ^[30]	动态 $Z-I$ 法(固定系数 b , 动态拟合 a)	有效降低了雷达定量降雨估测的系统误差
	方雪,2018 ^[31]	最优化法	$a=109$, $b=1.74$
	邵月红等,2009 ^[32]	最优化法、遗传算法、概率配对法	最优化法: $a=85$, $b=1.82$;遗传算法: $a=65$, $b=1.84$;概率配对法: $a=112$, $b=1.77$ 估算精度:遗传算法>最优化法>概率配对法
	王丽荣等,2008 ^[33]	概率配对法	4—6月: $a=54.48$, $b=2.43$;7—8月: $a=23.11$, $b=2.2$;9—10月: $a=91.09$, $b=1.82$
	王春青等,2010 ^[34]	概率配对法	$a=386$, $b=1.4$
西北地区	韦翔鸿,2015 ^[35]	分型 $Z-I$ 法	按计算单元到雷达中心距离和回波值大小分组,提出自适应的 $Z-I$ 关系模型
	陈静等,2015 ^[36]	动态 $Z-I$ 法,用最优化法处理	对强降雨有所低估
	张之贤等,2014 ^[37]	分型后使用最优化法计算短时强降雨系数	按计算单元到雷达中心距离分类: $0\sim 25$ km: $a=10$, $b=2.1$; $25\sim 70$ km: $a=25$, $b=1.7$; $70\sim 150$ km: $a=43$, $b=1.6$
	康磊,2017 ^[38]	最优化法	陕西北部: $a=367.67$, $b=1.68$;陕西南部: $a=62.67$, $b=1.82$
华南地区	韩洁等,2018 ^[39]	最小二乘法	积云降雨: $a=245.45$, $b=1.5$;层状云降雨: $a=134.58$, $b=1.46$;层积混合状降雨: $a=197.03$, $b=1.37$
	马慧等,2008 ^[40]	最小二乘法	小雨: $a=70$, $b=1.38$;小雨到中雨: $a=41$, $b=1.61$;中雨到大雨: $a=121$, $b=1.48$;暴雨及暴雨以上: $a=486$, $b=1.37$
	汪瑛等,2011 ^[41]	最优化法、动态分级法	最优化法: $a=220.8$, $b=2.23$;动态分级法精度优于最优化法
	伍静等,2010 ^[42]	固定 $Z-I$ 法	$a=311$, $b=1.71$ (混合型降水)
	梁建茵等,2011 ^[43]	概率配对法	对 a 、 b 值无具体说明
西南地区	高晓荣等,2012 ^[44]	概率配对法	对 a 、 b 值无具体说明
	王艳兰等,2007 ^[45]	最优化法	小雨: $a=280$, $b=1.5$;大雨: $a=160$, $b=1.2$
	庄薇等,2013 ^[46]	a 值平均法	零度层以上固态降雨: $a=11$, $b=2.0$;零度层以下液态降雨: $a=58$, $b=1.6$;零度层亮带: $a=29$, $b=1.6$
	范江琳,2013 ^[47]	最优化法	稳定型: a 的范围为[174,270], b 的范围为[1.55,2.32];混合型: a 的范围为[183,305], b 的范围为[1.43,2.13];对流型: a 的范围为[245,383], b 的范围为[1.29,1.50]
肖晨,2014 ^[12]	神经网络算法	对 a 、 b 值无具体说明	

在不同地区,学者考虑区域特点,将降雨按照距雷达远近、反射率值、降水相态、降雨特征等分类,结果表明不同组 a 、 b 值差异很大,表明分类计算 a 、 b 值是十分必要的。分析计算结果,主要规律包括:(1) a 值的变化范围在 10~400, b 值的变化范围在 1.2~3.8, a 、 b 之间存在显著负相关关系(图 1),该结果与 Nikahd 等^[11]的研究结果一致;(2)西南地区 a 值是所有地区中最大的,华东和华北地区 b 值较其他区域大(图 2),若取均值作为各区域转换关系,当反射率因子相

同时,华南和西北地区反演的雨强较大;其次是西南地区;华东和华北地区反演的雨强最小(图 3);(3)分雨型统计结果表明,积状云降雨的 a 值与层状云和混合型降雨在 95% 置信度上有显著差别,并且积状云降雨 a 值较大、 b 值较小(图 4)。该结论与过去研究结果接近,Wilson 等^[48]的综述表明,随着对流强度增加, a 值增大, b 值减小。

因此,若要直接使用 $Z-I$ 关系计算雷达降雨场,需要考虑区域特点或主要降雨类型,选取合适的 a 、 b 值。

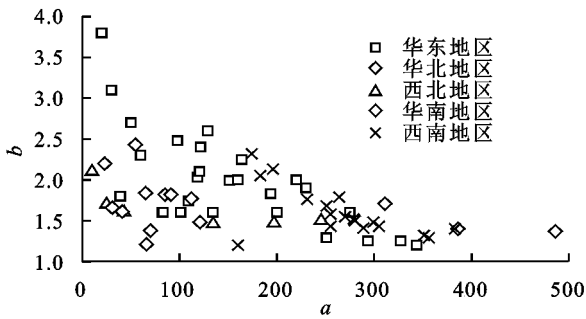
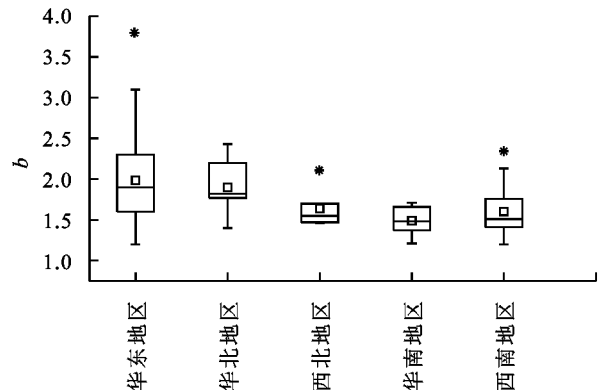
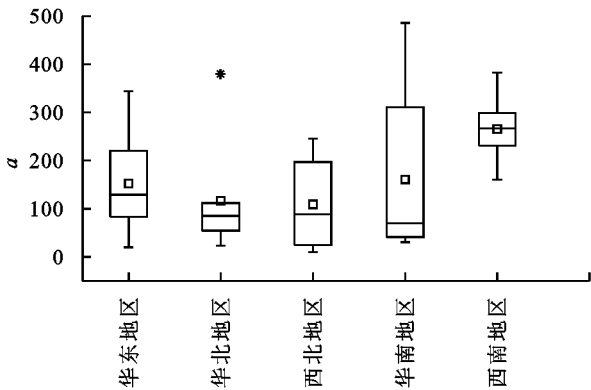
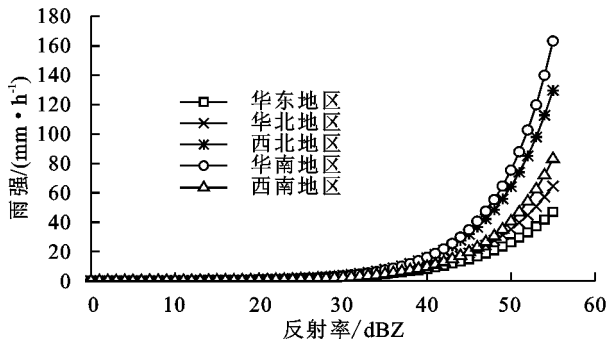


图 1 各区域 a 、 b 值散点图



注: 箱体内的横线表示数据的中位数; 箱体上下边缘分别表示数据的上下四分位数, 箱体中的小方块为均值; 由箱体边缘向上下延伸的外端点分别表示数据的非异常范围内的最大值和最小值, 非异常范围为箱体边缘加减 1.5 倍四分位距; * 表示异常值。下同图 4。

图 2 各地区 a 、 b 值箱线图



注: 取各区域研究结果均值为转换关系。

图 3 各区域反演雨强随反射率值变化

1970 年, Wilson^[49] 的研究表明, 雨量计密度小于 1 站/3 400 km² 时, 用雨量计校准雷达能提高雷达降雨场的精度, 并提出了将雨量计总雨量与雷达总雨量的比值作为校准因子的方法。该方法能简单地减少雷达降雨场整体高估或低估的系统偏差, Thorndahl 等^[50] 使用平均场偏差法来校正雷达数据。他们发现, 与冬季相比, 夏季存在较大偏差。这种季节性的误差变化主要由降雨类型导致, 对流性降雨系统会引起较大偏差。基于该方法, Seo 等^[51] 发展了局部偏差校正法, 考虑了偏差的空间分布; Sokol^[52] 采用分步校正的局部线性回归方法, 结果发现与校正前相比, 当雨量计站点密度为 1 站/1 000 km² 和 1 站/4 000 km² 时, 精度可分别提高 15% 和 10%; Collier 等^[53] 提出分区域校正方法, 引入与降雨类型有关的校正因子。近年来, 雷达降雨场的校正常借助地统计

1.2 联合雨量计校正法

a 、 b 的取值与雨滴谱分布有关, 统一的 a 、 b 值不能精确估计所有场次的降雨。因此, 在 $Z-I$ 转换关系的基础上, 有些学者采用雨量计资料校正雷达初始降雨场, 以提高其精度。利用雨量计资料校正雷达初始降雨场的基本思路是: 先基于某种 $Z-I$ 关系计算雷达初始降雨场, 比较雷达初始降雨场与雨量计观测值的差别, 用统计学或插值方法计算得到校正权重或者偏差场, 校正初始降雨场, 使其更接近实际降雨场。

学方法, 结合空间特征, 插值地面雨量计降雨量或者偏差场, 并进行比较。Goudenhoofdt 等^[54] 的研究表明, 结合地统计学的校正方法能减少 40% 的误差; Sideris 等^[55] 在瑞士山区, 采用协同克里金方法, 使用前一段时间降雨数据作为协变量, 结合时空信息, 校正雷达降雨场; Berndt 等^[56] 比较了不同插值技术的精度, 结果表明采用普通克里金插值方法, 用条件合并技术模拟降雨场的精度最好; Schiemann 等^[57] 用雷达数据确定半变异函数模型, 直接插值雨量计数据, 获得降雨场。一些学者还提出了许多更复杂的校正方法, 例如, 概率分布匹配法^[58-60]、变分法^[61]、随机模型误差法^[62-63] 等。

在国内, 许多研究也表明利用雨量计校正雷达资料能提高雷达降雨场的精度。东高红等^[64] 研究了雨量计密度对雷达降雨校正的影响, 表明雨量计密度越大, 校正效果越好, 当雨量计密度为 1 站/121 km² 时, 校正的效果与真值场相当。还有一些学者在不同区域用不同校正方法做了试验: 1992 年, 张培昌等^[65] 证明变分校正法能显著提高次降雨的估计精度, 还能保留没有雨量计站的地方雷达探测到的降雨强度变化; 林炳干等^[66]、王叶红等^[67]、马慧等^[40] 分别分析了南京、鄂东和广州地区变分校正法对降雨反演精度的改进作用; 赵坤等^[68]、郑媛媛等^[69] 采用卡尔曼滤波法确定变分法的权重系数, 校正淮河流域的雷达初始降雨场; 张亚萍等^[70] 在重庆比较了局地平均校正法和局地分级平均

校正法,表明 2 种方法的降雨反演效果均与所取的局地校正半径大小有关;伍静等^[42]将最优插值校正法

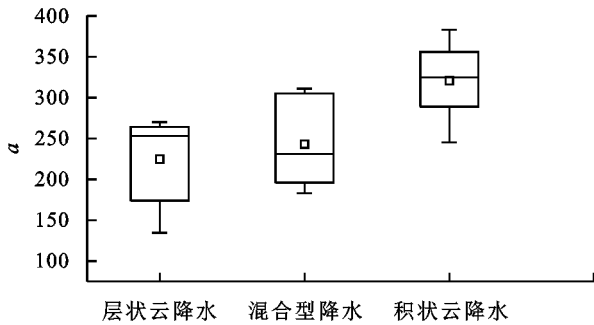


图 4 不同类型降雨 a 、 b 值箱线图

同时,许多研究结合 $Z-I$ 关系法和雨量计校正法,先利用过去资料建立 $Z-I$ 关系,再用每场降雨的雨量计数据校正降雨场^[72-73]。另外,其他提高雷达估测降雨精度的研究也在进展中,史朝等^[74]根据雷达反射率因子垂直廓线特征,探讨分析了不同类型降雨过程中雷达定量估测降雨的误差源;庄薇等^[75]提出了青藏高原零度层亮带的识别订正方法,提高了青藏高原地区雷达降雨估测的精度等。

2 雷达反演降雨在土壤侵蚀中的应用

鉴于在中小尺度暴雨监测及其面雨量估计的优势,雷达降雨资料可以应用于水文模型或土壤侵蚀模型,监测水文过程和土壤侵蚀过程。雷达在水文中的应用已日益受到关注,张利平等^[76]的综述表明,雷达资料在洪灾监测预报中有很好的应用前景。在这篇综述中,还介绍了各国将雷达资料应用于水文预报的进展,包括:美国国家河流预报系统、英国河流预报系统和水文雷达系统等。在国内,相关的研究包括河流防洪系统与临近径流的预报^[77-79]、水库流量的模拟^[80]、山洪模拟^[81-83]和城市洪涝模拟^[84-85]等。

雷达降雨资料具有高时空分辨率特点,但是时间序列长度常常有限,所以雷达降雨资料在土壤侵蚀中的应用主要集中在次降雨侵蚀力和次土壤流失量的估算。土壤侵蚀模型大致可分为经验模型(美国 USLE\ RUSLE, 中国 CSLE 等^[86-87])和机理模型(WEPP 等^[88])2 类,将分别从这 2 个方面介绍雷达降雨资料在土壤侵蚀评估和监测预报中的应用。

2.1 雷达降雨资料应用于土壤侵蚀经验模型

在大量的径流小区试验观测和分析统计基础上,Wischmeier 等^[87]提出了通用土壤流失方程 USLE,广泛应用于土壤流失预报。在该经验模型中,用降雨侵蚀力因子 R ($(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{h} \cdot \text{hm}^2)$) 表示降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,以 EI_{30} 指数来反映。在一段时间内,降雨侵蚀力为该时间段内所有侵蚀性次降雨产生的 EI_{30} 的总和,即:

应用于广东的雷达降雨估测中;Yeung 等^[71]在香港地区采用协同克里金方法校正雷达降雨场。

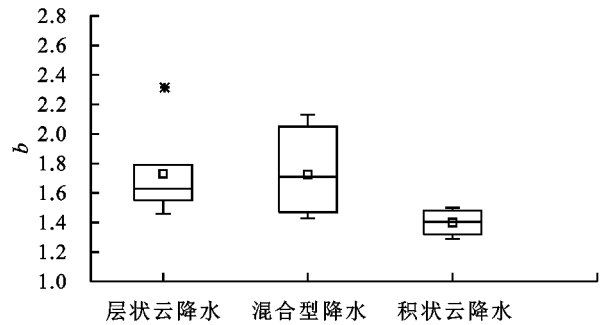


图 4 不同类型降雨 a 、 b 值箱线图

$$R = \sum_{k=1}^n (EI_{30})_k \quad (1)$$

$$EI_{30} = E \times I_{30} \quad (2)$$

式中: n 为一段时间内侵蚀性次降雨的次数; k 表示第 k 次降雨; E 为次降雨总动能 (MJ/hm^2); I_{30} 为次降雨最大 30 min 雨强 (mm/h)。次降雨总动能 E 的计算方法为:

$$E = \sum_{j=1}^N e_j \times d_j \quad (3)$$

使用雷达反射率因子,经过 $Z-I$ 关系转换和雨量计校正,得到等间隔降雨过程资料(如 10 min, 6 min 等),公式(3)中: j 表示第 j 个时段; N 为 1 场降雨包含的时段数; e 为单位时段降雨动能 ($\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$); d 为单位时段降雨量 (mm)。单位时段降雨动能的计算在不同经验模型中有不同的计算方法,在 RUSLE2 中^[89], e_j 的计算方法为:

$$e_j = 0.29(1 - 0.72 \exp(-0.082 i_j)) \quad (4)$$

式中: i_j 为第 j 个时段的雨强 (mm/h)。

由于降雨时空变异性很大,用高时空分辨率雷达降雨资料估算 R 因子,可以提高其估算精度,从而提高土壤侵蚀预报的即时性和时空分辨率。2011 年, Nyman 等^[90]在澳大利亚东北部进行次暴雨导致土壤侵蚀量的调查时,将一场降雨的总降雨量按雷达反射率因子的分布信息分配为 10 min 等间隔, $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ 网格的降雨,输入 RUSLE 模型中估算次土壤侵蚀量。2016 年, Fischer 等^[91]直接使用雨量计校准后的时间分辨率为 5 min,空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的雷达降雨资料计算德国南部的降雨侵蚀力,将其输入模型 USLE 中,计算次土壤侵蚀量。将模拟结果与高分辨率航空照片监测土壤侵蚀状况进行对比,结果表明在极端次降雨中使用高时空分辨率的降雨资料进行土壤侵蚀评估十分必要^[92]。2018 年, Risal 等^[93]基于默认层状云雷达 $Z-I$ 关系获得时间分辨率为 10 min、空间分辨率为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 的雨量数据,使用 USLE 中降雨侵蚀力的计算方法估算 R 因子的空间分布,并汇总到月尺度,生成降雨侵蚀

力空间分布图,将雷达资料估算的土壤侵蚀量与实验结果对比,结果表明用雷达资料计算的高时空分辨率 R 因子能显著提升土壤侵蚀量的估计精度。Zhu 等^[94]和 Yang 等^[95]使用 RUSLE 模型和雷达资料反演的 10 min 雨量计算次降雨侵蚀力,进而估算日降雨侵蚀力,来监测火灾后澳大利亚国家公园的土壤侵蚀量并生成侵蚀风险日变化图,显示坡面侵蚀风险的时空变化,这种方法能及时地处理当日数据,起到侵蚀风险评估和实时监测的作用。

2.2 雷达降雨资料应用于土壤侵蚀机理模型

1985 年,美国农业部水土保持局组织开展水蚀预报项目 WEPP (Water Erosion Prediction Project),该模型模拟土壤沟蚀、沟间侵蚀和泥沙运动机理,旨在改善经验模型中对短尺度侵蚀过程估计误差大、未考虑搬运和沉积过程等缺陷^[96-97]。WEPP 模拟的水蚀过程包括入渗、径流、土壤颗粒分离、泥沙搬运和沉积等。1969 年, Meyer 等^[98]给出了雨滴对土壤颗粒分离和泥沙搬运的数学表达,用质量平衡方程模拟土壤净流失量,其中,假设由降雨导致的分离作用与降雨动能和雨强的乘积 (EI) 成正比,并将降雨动能用雨强表示,最终将方程写成了土壤性质(试验测定 1 个常数)与雨强的方程。而降雨导致的泥沙搬运和沉积分别写成地形、雨量、径流量和土壤性质的函数。Meyer 等^[98]的研究结果成为 WEPP 模型的基本方程之一。综上,雨量和雨强的准确估计是提高 WEPP 模拟土壤侵蚀精度的重要因素。

2006 年,爱荷华州立大学 Cruse 等^[99]基于雷达降雨资料和 WEPP 模型建立了日侵蚀监测项目。在该项目工作过程中,程序每天自动下载所需数据,其中,天气数据包括 2 种雷达降雨产品:1 h 累积降雨量和 15 min 累积降雨量。由于 1 h 雷达累积降雨量产品经过质量控制,并且联合雨量计作了平均偏差校正,降雨量质量较好,因此根据每 15 min 雷达降雨量产品在 1 h 内的占比,在每个网格上,将 1 h 累积降雨量降尺度到 15 min,获得空间分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 的 15 min 等间隔网格降雨过程资料。若网格上的日降雨总量大于 0,则启用 WEPP 模型处理水文降雨分析模块,输入处理好的 15 min 等间隔降雨过程资料,计算径流量和侵蚀量。在所有输出完成之后,将总降雨、径流和土壤侵蚀平均到县级(空间分辨率为 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$),并在网站(<https://dailyerosion.org/>)上公布每日降雨量、径流量和坡面土壤流失量,以分级的形式在地图上显示。后来,该项目不断更新和扩展数据库,使用分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 5 min 的天气雷达降雨资料,结合了地表覆盖遥感资料,地形和土壤数据库等,实现了美国中西部 2 000 多个水文单位(hydro-

logic unit)实时的动态侵蚀监测^[100]。Gelder 等^[101]采用空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ (经纬度),时间分辨率为 2 min 的雷达降雨数据,用遥感数据获得小流域尺度上的其他输入数据,如地形数据等,在 WEPP 模型中模拟径流、土壤分离等过程,建立了精度更高的输入数据库,拓展了日侵蚀监测项目的应用。

通过爱荷华州立大学日侵蚀监测项目的开发和研究, Cruse 等^[99]和 Gelder 等^[100]利用雷达资料建立了估算日径流量和土壤侵蚀量的方法,可以提高土壤侵蚀监测的时空分辨率。同时,也指出目前该项目由于缺少土壤侵蚀观测数据,难以评估其准确性,并且主要关注土壤分离,未与搬运和沉积过程联系起来, WEPP 模型中雷达降雨数据与其他输入数据库也存在数据不匹配等问题,限制了模型的发展。未来的工作中,需要提高降雨估测的准确性和土地管理、地形等输入数据的空间分辨率,在模型方面可以扩展到搬运和沉积等过程,用于解决由土壤侵蚀带来的水土流失与非点源污染等问题。

2.3 雷达降雨资料应用于土壤侵蚀的未来工作

天气雷达反演的高时空分辨率降雨资料,可直观反映降雨系统的空间结构和强弱特征。天气雷达在降雨系统的监测、降雨的定量估测以及短期降雨预报等方面有很重要的应用价值。在无资料地区与中小尺度强降雨的监测预警中,其优越性尤为明显。目前,将雷达降雨资料应用于土壤侵蚀工作尚处于起步阶段,大多数研究集中于土壤侵蚀的监测和评估,其应用技术仍有巨大潜力,可进一步研究的内容包括:

(1)提高雷达反演降雨的精度,评估其精度对土壤侵蚀模型模拟精度的影响。评估不同反演方法对不同地区雷达降雨产品精度的影响;评估雷达雨量反演中不确定性的来源及其对土壤侵蚀模型模拟的影响;分析雷达测雨过程中空间和时间的采样误差,研究雷达时空降雨累积对不同时空尺度土壤流失量估算精度的影响。

(2)匹配雷达降雨数据与土壤侵蚀模型其他影响因素。研究雷达降雨数据与土壤侵蚀模型中其他影响因素数据的时空精度匹配问题,确定雷达降雨资料与土壤侵蚀模型结合的最佳方式。

(3)推广雷达降雨数据在土壤侵蚀监测和预报业务中的应用。与雷达测雨系统相结合,完善土壤侵蚀因子相关数据库,提高软件和机器计算性能,发展极端降雨事件导致土壤侵蚀的实时监测业务;基于实时雷达降雨数据,结合短期天气预报(NWP),发展短期降雨概率预报,输入土壤侵蚀模型,进行短期土壤侵蚀预报和预警。

(4)基于雷达降雨数据发展降雨场统计降尺度模

型,应用于变化气候条件下土壤侵蚀长期预估。基于高时空分辨率雷达降雨数据,分析降雨场时空尺度转换关系,发展降雨场统计降尺度模型,结合全球和区域气候模式(GCMs/RCMs)对未来大尺度天气的预估,模拟生成未来高精度降雨场,输入土壤侵蚀模型,进行变化气候条件下土壤侵蚀长期预估。

参考文献:

- [1] 刘黎平,葛润生.中国气象科学研究院雷达气象研究50年[J].应用气象学报,2006,17(6):682-689.
- [2] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
- [3] 殷水清,谢云,王春刚.用小时降雨资料估算降雨侵蚀力的方法[J].地理研究,2007,26(3):541-547.
- [4] Xie Y, Yin S Q, Liu B Y, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J].Journal of Hydrology,2016,535:547-558.
- [5] Marshall J S, Langille R C, Palmer W M K. Measurement of rainfall by radar[J].Journal of Meteorology,1947,4(6):186-192.
- [6] Steiner M, Smith J A, Uijlenhoet R. A microphysical interpretation of radar reflectivity-rain rate relationships [J].Journal of the Atmospheric Sciences,2004,61(10):1114-1131.
- [7] Uijlenhoet R. Raindrop size distributions and radar reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology[J].Hydrology and Earth System Sciences,2001,5(4):615-627.
- [8] Mason B J, Andrews J B. Drop-size distributions from various types of rain[J].Royal Meteorological Society,1960,86(369):346-353.
- [9] Wu W X, Zou H B, Shan J S, et al. A dynamical $Z-R$ relationship for precipitation estimation based on radar echo-top height classification[J].Advances in Meteorology,2018,2018:1-11.
- [10] Moreno H A, Vivoni E R, Gochis D J. Addressing uncertainty in reflectivity-rainfall relations in mountain watersheds during summer convection[J].Hydrological Processes,2014,28(3):688-704.
- [11] Nikahd A, Hashim M, Nazemosadat S M J. An improved algorithm for precipitation radar calibration[C].ICESB 2014: December 29-30, Phuket, Thailand,2014:1-6.
- [12] 肖晨.人工神经网络在雷达定量测量降水中的研究与实现[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [13] 刘金涛,李致家.基于雷达测雨的实时洪水预报模型[J].河海大学学报(自然科学版),2004,32(5):488-491.
- [14] Smith L P. Derivation of an $R-Z$ relation by computer optimization and its use in measuring daily areal rainfall[C].16th Radar Meteorology Conference, Boston, American,1975:461-466.
- [15] Calheiros R V, Zawadzki I. Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil[J].Journal of Applied Meteorology,1987,26(1):118-132.
- [16] Rosenfeld D, Wolff D B, Atlas D. General probability-matched relation between radar reflectivity and rain rate[J].Journal of Applied Meteorology,1993,32(1):50-72.
- [17] Hasan M M, Sharma A, Johnson F, et al. Merging radar and in situ rainfall measurements: An assessment of different combination algorithms [J]. Water Resources Research,2016,52(10):8384-8398.
- [18] Yu B, Seed A, Pu L, et al. Integration of weather radar data into a raster GIS framework for improved flood estimation [J]. Atmospheric Science Letters,2005,6(1):66-70.
- [19] Battan L J. Radar observation of the atmosphere[M]. Chicago: University of Chicago Press,1973.
- [20] Prat O P, Barros A P. Exploring the transient behavior of $Z-R$ relationships: Implications for radar rainfall estimation[J].Journal of Applied Meteorology and Climatology,2009,48(10):2127-2143.
- [21] Fang X, Shao A M, Yue X J, et al. Statistics of the $Z-R$ relationship for strong convective weather over the Yangtze-Huaihe River basin and its application to radar reflectivity data assimilation for a heavy rain event[J].Journal of Meteorological Research,2018,32(4):598-611.
- [22] Wardah T, Ramli S, Sazali O, et al. Radar rainfall calibration for improved quantitative precipitation estimates in Kelantan and Terengganu river basins[J].International Journal of Civil Engineering and Technology,2018,9(8):27-36.
- [23] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2005.
- [24] 戴铁丕,张培昌,薛根源.确定 $Z-I$ 关系的几种方法及其在定量测雨中的精度[J].南京气象学院学报,1983(2):215-222.
- [25] 张培昌,戴铁丕,王登炎,等.最优化法求 $Z-I$ 关系及其在测定降水量中的精度[J].气象科学,1992,12(3):333-338.
- [26] 刘娟,宋子忠,刘东风,等.分组 $Z-I$ 关系及其在淮河流域雷达测雨中应用[J].气象科学,1999,19(2):213-220.
- [27] 郑媛媛,吴林林,李劲,等.多普勒雷达定量估算淮河流域降水量结果分析[C].新世纪气象科技创新与大气科学发展—中国气象学会2003年年会“03.7 淮河大水的水文气象学问题”分会论文集.中国气象学会2003年年会,2003.
- [28] 何宽科,范其平,李开奇,等.舟山地区台风降水 $Z-R$ 关系研究及其应用[J].应用气象学报,2007,18(4):573-576.
- [29] 姚燕飞. $Z-I$ 关系对雷达测量流域面雨量和径流模拟影响的研究[D].北京:中国气象科学研究院,2007.
- [30] 勾亚彬,刘黎平,杨杰,等.基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估[J].气象学报,2014,72(4):731-748.
- [31] 方雪.江淮流域强对流天气的 $Z-R$ 关系统计及其在雷达资料同化中的应用[D].兰州:兰州大学,2018.
- [32] 邵月红,张万昌,刘永和,等.沂沭河流域不同多普勒雷

- 达降水量估算方法的效果评估[J].大气科学,2009,33(5):971-980.
- [33] 王丽荣,裴宇杰,王立荣,等.概率配对比法在雷达定量估测降水中的应用[J].气象与环境科学,2008(增刊1):195-199.
- [34] 王春青,赵坤,张勇,等.黄河三花区间天气雷达测雨技术应用研究[J].水文,2010,30(2):62-65.
- [35] 韦翔鸿.雷达定量降水估测自适应优化算法研究[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [36] 陈静,铃伟妙,韩军彩,等.基于动态 $Z-I$ 关系雷达回波定量估测降水方法研究[J].气象,2015,41(3):296-303.
- [37] 张之贤,张强,赵庆云,等.陇东南地区短时强降水的雷达回波特征及其降水反演[J].高原气象,2014,33(2):530-538.
- [38] 康磊.基于最优 $Z-I$ 关系雷达定量估测降水动态订正方法研究[D].兰州:兰州大学,2017.
- [39] 韩洁,李恩莉,冯富强.多普勒天气雷达在不同降水类型中 $Z-R$ 关系及检验:以宝鸡市为例[J].绿色科技,2018,(8):209-210.
- [40] 马慧,万齐林,陈子通,等.基于 $Z-I$ 关系和变分校正法改进雷达估测降水[J].热带气象学报,2008,24(5):546-49.
- [41] 汪瑛,冯业荣,蔡锦辉.雷达定量降水动态分级 $Z-I$ 关系估算方法[J].热带气象学报,2011,27(4):601-608.
- [42] 伍静,刘黎平,尤卫红.应用雷达拼图数据估测降水试验[J].气象科技,2010,38(2):175-81.
- [43] 梁建茵,胡胜.雷达回波强度拼图的定量估测降水及其效果检验[J].热带气象学报,2011,27(1):1-10.
- [44] 高晓荣,梁建茵,李春晖.雷达定量降水估计技术及效果评估[J].热带气象学报,2012,28(1):77-88.
- [45] 王艳兰,汤达章,周文志,等.多普勒雷达降水产品优化[J].气象研究与应用,2007,28(1):41-44.
- [46] 庄薇,刘黎平,王改利,等.青藏高原复杂地形区雷达估测降水方法研究[J].高原气象,2013,32(5):1224-1235.
- [47] 范江琳.多普勒天气雷达在定量测量降水及短时强降水预报中的应用[D].成都:成都信息工程学院,2013.
- [48] Wilson J W, Brandes E A. Radar measurement of rainfall: A summary[J].Bulletin of the American Meteorological Society,1979,60(9):1048-1060.
- [49] Wilson J W. Integration of radar and raingage data for improved rainfall measurement[J].Journal of Applied Meteorology,1970,9(3):489-497.
- [50] Thorndahl S, Nielsen J E, Rasmussen M R. Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series[J].Journal of Hydrology,2014,508:214-226.
- [51] Seo D, Breidenbach J P. Real-time correction of spatially nonuniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements[J].Journal of Hydrometeorology,2002,3(2):93-111.
- [52] Sokol Z. Utilization of regression models for rainfall estimates using radar-derived rainfall data and rain gauge data[J].Journal of Hydrology,2003,278(1/4):144-152.
- [53] Collier C G, Larke P R, May B R. A weather radar correction procedure for real-time estimation of surface rainfall[J].Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society,1983,109(461):589-608.
- [54] Goudenhoofd E, Delobbe L. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates[J].Hydrology and Earth System Sciences,2008,13(2):195-203.
- [55] Sideris I V, Gabella M, Erdin R, et al. Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2014,140(680):1097-1111.
- [56] Berndt C, Rabiei E, Haberlandt U. Geostatistical merging of rain gauge and radar data for high temporal resolutions and various station density scenarios[J].Journal of Hydrology,2014,508:88-101.
- [57] Schiemann R, Erdin R, Willi M, et al. Geostatistical radar-raingauge combination with nonparametric correlograms: Methodological considerations and application in Switzerland[J].Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(5):1515-1536.
- [58] Ayat H, Reza Kavianpour M, Moazami S, et al. Calibration of weather radar using region probability matching method (RPMM)[J].Theoretical and Applied Climatology,2018,134(1/2):165-176.
- [59] Rabiei E, Haberlandt U. Applying bias correction for merging rain gauge and radar data[J].Journal of Hydrology,2015,522:544-557.
- [60] Chumchuan S, Sharma A, Seed A. Radar rainfall error variance and its impact on radar rainfall calibration[J].Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,2003,28(1/3):27-39.
- [61] Chumchuan S, Sharma A, Seed A. An integrated approach to error correction for real-time radar-rainfall estimation[J].Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2006,23(1):67-79.
- [62] Hasan M M, Sharma A, Johnson F, et al. Correcting bias in radar $Z-R$ relationships due to uncertainty in point rain gauge networks[J].Journal of Hydrology,2014,519:1668-1676.
- [63] Jordan P W, Seed A W, Weinmann P E. A stochastic model of radar measurement errors in rainfall accumulations at catchment scale[J].Journal of Hydrometeorology,2003,4(5):841-855.
- [64] 东高红,刘黎平.雨量计密度对校准雷达估测降水的影响及单点对校准的贡献[J].气象,2012,38(9):1042-1052.
- [65] 张培昌,戴铁丕,傅德胜,等.用变分方法校准数字化天气雷达测定区域降水量基本原理和精度[J].大气科学,1992,16(2):248-256.
- [66] 林炳干,张培昌,顾松山.天气雷达测定区域降水量方法的改进与比较[J].南京气象学院学报,1997,20(3):

- 67-73.
- [67] 王叶红,崔春光,赵玉春,等.变分技术在校准数字化天气雷达定量估测降水中的应用[J].气象,2001,27(10):3-7.
- [68] 赵坤,刘国庆,葛文忠.用卡尔曼滤波确定变分方法中的权重系数进行雨量校正[J].气候与环境研究,2001,6(2):180-185.
- [69] 郑媛媛,谢亦峰,吴林林,等.多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验[J].热带气象学报,2004,20(2):192-197.
- [70] 张亚萍,张勇,廖峻,等.天气雷达定量降水估测不同校准方法的比较与应用[J].气象,2013,39(7):923-929.
- [71] Yeung H Y, Man C, Chan S T, et al. Development of an operational rainfall data quality-control scheme based on radar-raingauge co-kriging analysis [J]. Hydrological Sciences Journal,2014,59(7):1285-1299.
- [72] Wang G L, Liu L P, Ding Y Y. Improvement of radar quantitative precipitation estimation based on real-time adjustments to Z-R relationships and inverse distance weighting correction schemes[J].Advances in Atmospheric Sciences,2012,29(3):575-584.
- [73] 张岳.多普勒天气雷达定量估测降水方案改进[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [74] 史朝,范凯波,李学华,等.X波段全固态天气雷达降水探测能力的研究[J].大气科学学报,2013,36(3):379-384.
- [75] 庄薇,刘黎平,胡志群.青藏高原零度层亮带的识别订正方法及在雷达估测降水中的应用[J].气象,2013,39(8):1004-1013.
- [76] 张利平,赵志朋,胡志芳,等.雷达测雨及其在水文水资源中的应用研究进展[J].暴雨灾害,2008,27(4):373-377.
- [77] 滑申冰,宋宗朋,胡菊,等.多源降水信息在秦淮河流域洪水模拟中的应用[J].人民长江,2018,49(12):10-15.
- [78] 李晶.HEC-HMS水文模型结合雷达测雨在西苕溪流域径流模拟中的应用[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [79] 张亚萍.利用新一代天气雷达观测资料制作流域径流预报的研究[D].南京:南京信息工程大学,2007.
- [80] 刘晓阳,毛节泰,李纪人,等.雷达联合雨量计估测降水模拟水库入库流量[J].水利学报,2002,33(4):51-55.
- [81] 谭盛杰.山洪早期预警中雷达降水估算探索[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [82] 廖慕科.多普勒雷达强降水预警在山洪灾害预警中的应用[J].农业灾害研究,2012,2(4):84-88.
- [83] 熊明,杨文发,李俊,等.多元信息耦合的致灾山洪降雨预报方法[J].水资源研究,2017,6(2):91-102.
- [84] 陈靖,解以扬,东高红,等.雷达雨量计联合估算降水在城市内涝模型中的应用[J].气象科技,2015,43(5):866-873.
- [85] Einfalt T, Arnbjerg-Nielsen K, Golz C, et al. Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage[J].Journal of Hydrology,2004,299(3/4):186-202.
- [86] 刘宝元,毕小刚,符素华.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- [87] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M].US-DA:Science and Education Administration,1978.
- [88] Nearing M A, Nicks A D. Evaluation of the water erosion prediction project (WEPP) Model for hillslopes [J].Modelling Soil Erosion by Water,1998,55:43-53.
- [89] Foster G R. User's reference guide: Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE2)[R]. Washington D C: USDA, 2004.
- [90] Nyman P, Sheridan G J, Smith H G, et al. Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia [J]. Geomorphology, 2011,125(3):383-401.
- [91] Fischer F, Hauck J, Brandhuber R, et al. Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resolved and adjusted radar rain data (RADOLAN)[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2016,223:72-80.
- [92] Fischer F K, Kistler M, Brandhuber R, et al. Validation of official erosion modelling based on high-resolution radar rain data by aerial photo erosion classification[J].Earth Surface Processes and Landforms,2018,43(1):187-194.
- [93] Risal A, Lim K J, Bhattarai R, et al. Development of web-based WERM-S module for estimating spatially distributed rainfall erosivity index (EI_{30}) using RADAR rainfall data[J].Catena,2018,161:37-49.
- [94] Zhu Q G Z, Yang X H, Yu B F, et al. Estimation of event-based rainfall erosivity from radar after wildfire[J].Land Degradation and Development,2018,30(1):33-48.
- [95] Yang X H, Zhu Q G Z, Tulau M, et al. Near real-time monitoring of post-fire erosion after storm events: A case study in Warrumbungle National Park, Australia[J].International Journal of Wildland Fire,2018,27(6):413-424.
- [96] 谢云,岳天雨.土壤侵蚀模型在水土保持实践中的应用[J].中国水土保持科学,2018,16(1):25-37.
- [97] Laflen J M, Flanagan D C. The development of U.S. soil erosion prediction and modeling[J]. International Soil and Water Conservation Research,2013,1(2):1-11.
- [98] Meyer L D, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water[J].Transactions of the ASAE,1969,12:754-758.
- [99] Cruse R, Flanagan D, Frankenberger J, et al. Daily estimates of rainfall, water runoff, and soil erosion in Iowa[J].Journal of Soil and Water Conservation,2006,61(4):191-199.
- [100] Gelder B K, Cruse R M, James D E, et al. The daily erosion project: An overview and summary[C].10th International Symposium on Agriculture and the Environment, Purdue University, West Lafayette, USA,2016:23-27.
- [101] Gelder B, Sklenar T, James D, et al. The Daily Erosion Project-daily estimates of water runoff, soil detachment, and erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2018,43(5):1105-1117.