

水蚀预报中降雨侵蚀力研究进展

何绍浪, 李凤英, 何小武

(江西农业大学 国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045)

摘要: [目的] 分析国内外水蚀预报中降雨侵蚀力的研究现状, 探讨降雨侵蚀力的未来研究方向, 为准确计算和预报区域降雨侵蚀力奠定基础。[方法] 通过查阅国内外文献, 从降雨侵蚀力不同研究方面进行综述和分析。[结果] 总结了降雨侵蚀力研究中常用的降雨侵蚀力指标、侵蚀性降雨标准, 评述了降雨侵蚀力 R 值的简易计算模型及降雨侵蚀力 R 值时空分布的研究进展。同时分析了当前降雨侵蚀力研究中存在的不足并指出其发展前景。[结论] 国内外在降雨侵蚀力指标和降雨侵蚀力时空分布等方面已取得了一定的成果, 今后需加强侵蚀降雨标准、降雨侵蚀力简易计算模型、降雨侵蚀力的影响因素等研究。

关键词: 降雨侵蚀力; 简易计算模型; 时空分布; 水蚀预报

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)02-0262-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 何绍浪, 李凤英, 何小武. 水蚀预报中降雨侵蚀力研究进展[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 262-270. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.043. He Shaolang, Li Fengying, He Xiaowu. Research progress of rainfall erosivity for water erosion prediction[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2):262-270.

Research Progress of Rainfall Erosivity for Water Erosion Prediction

HE Shaolang, LI Fengying, HE Xiaowu

(College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: [Objective] This paper aimed to show present research on situation of rainfall erosivity, and to discuss the development of rainfall erosivity and to provide foundation for accurate calculation and prediction of regional rainfall erosivity. [Methods] The research progress of rainfall erosivity was analyzed by reviewing related literatures in different aspects. [Results] Rainfall erosivity index and erosive rainfall standard were summarized. In addition, the research progresses for simple calculation models of rainfall erosivity and dynamic change of rainfall erosivity were reviewed. The limitations of rainfall erosivity research were also analyzed and some suggestions were put forward. [Conclusion] Rainfall erosivity index, and dynamic change of rainfall erosivity have been made some achievements. Erosive rainfall standard, and simple calculation models of rainfall erosivity, influencing factors of rainfall erosivity research need to be strengthened in the future.

Keywords: rainfall erosivity; simple calculation model; dynamic change; water erosion prediction

严重的土壤侵蚀导致土地退化、土壤理化性质变劣、土壤肥力下降、土地利用效率降低、生态环境恶化, 成为当前全世界重要的环境问题之一。定量预报土壤侵蚀对防治土壤侵蚀、合理利用土地资源、区域水土保持规划等具有重要意义。通用土壤流失方程 (USLE) 和修正通用土壤流失 (RUSLE) 尽管只是经验模型, 但由于其结构简单、应用方便等诸多特点, 成为目前应用最为广泛的土壤水蚀预报模型。降雨侵

蚀力是模型中首要的基础因子, 表征降雨引起土壤侵蚀的潜在能力, 与降雨强度、降雨量、降雨历时等降雨参数有关, 反映了降雨对土壤侵蚀的作用能力。本文在系统介绍降雨侵蚀力指标、侵蚀性降雨标准、降雨侵蚀力 R 值的简易计算模型、降雨侵蚀力时空分布等研究成果的基础上, 分析了当前降雨侵蚀力研究中存在的不足, 并指出其发展前景, 旨在为当前和未来土壤侵蚀预报提供理论依据。

收稿日期: 2017-09-13

修回日期: 2017-10-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“南方红壤区急陡坡土壤侵蚀机理研究”(31300594); 中国气象局气候变化专项“鄱阳湖流域土壤侵蚀对气候变化的响应研究”(CCSF201320)

第一作者: 何绍浪(1990—), 男(汉族), 江西省兴国县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: heshaulang@sina.com。

通信作者: 何小武(1970—), 男(汉族), 江西省石城县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。E-mail: he-xw@163.com。

1 降雨侵蚀力指标

半个多世纪以来,有关降雨侵蚀力指标确定的研究成果丰硕。1959 年 Wischmeier^[1]通过分析美国 8 000 多个小区资料首次明确提出将次降雨总能量(E)与该次降雨最大 30 min 雨强(I_{30})的乘积 EI_{30} 作为降雨侵蚀力指标。英国学者哈德逊^[2]在非洲发现土壤侵蚀总是由雨强在 25.4 mm/h 以上的降雨引起,并用高于 25.4 mm/h 的降雨的总能量 KE 表示降雨侵蚀力指标。Foster 等^[3]则通过对降雨量、雨强、径流量、降雨历时等各种降雨参数及其组合因子系统分析表明,包含降雨量、雨强和径流量的综合指标优于 EI_{30} 。从 20 世纪 80 年代开始,中国众多学者也提出了一系列降雨侵蚀力指标,具体详见表 1。总体来看,由于中国各地区气候类型等不同,降雨特点存在差异,各地区

降雨侵蚀力指标不一。尽管如此,王万忠等^[4]认为 EI_{30} 基本兼顾了中国绝大多数地区的降雨特性,且预报效果相对较好。此外,关于次降雨总动能的计算,Wischmeier^[1]建立的 EI_{30} 法中已有明确的动能计算公式。当断点雨强大于 76 mm/h 时,也可以采用 Brown 等^[5]建立的动能计算公式进行代替,而且后者弥补了前者的函数不连续和雨强大雨某一临界值后,单位降雨动能恒为常数的不足。江忠善等^[6]、刘素媛等^[7]、黄炎和等^[8]、周伏建等^[9]结合中国各区域天然降雨特性分别建立不同雨型的地区动能计算公式。研究^[4]表明,Wischmeier 的动能计算公式在我国基本适用,但对于中国南方强度较大的暴雨计算结果可能有较大误差。因此,在使用 EI_{30} 法进行计算降雨侵蚀力时还应结合研究区域的天然降雨特性选择合适动能方程,或对已用的动能方程进行验证并修正。

表 1 中国学者提出的降雨侵蚀力指标汇总

来源	指标	参数	研究地区
王万忠 ^[10]	$E_{60} I_{10}$ 或 EI_{10}	E_{60} 为次降雨最大 60 min 雨强对应的降雨动能, (MJ/hm^2); I_{10} 为次降雨最大 10 min 雨强 (mm/h)	黄河流域子洲径流试验站
贾志军等 ^[11]	EI_{10}	I_{10} 为次降雨最大 10 min 雨强 (mm/h)	晋西黄土丘陵沟壑区
姚治君等 ^[12]	$I_{10} I_{60} I_a$	I_{10}, I_{60}, I_a 分别为次降雨最大 10 min、最大 60 min、平均雨强 (mm/h)	云南省玉龙山区
张宪奎等 ^[13]	$E_{60} I_{30}$	E_{60} 为次降雨最大 60 min 雨强对应的降雨动能 (MJ/hm^2); I_{30} 为次降雨最大 30 min 雨强 (mm/h)	黑龙江省
陈法扬等 ^[15]	EI_5 或 EI_{30}	I_5 为次降雨最大 5 min 雨强 (mm/h); I_{30} 为次降雨最大 30 min 雨强 (mm/h)	广东省小良镇
黄炎和等 ^[8]	EI_{60}	I_{60} 为次降雨最大 60 min 雨强 (mm/h)	福建省安溪县
周伏建 ^[9]	EI_{60}	I_{60} 为次降雨最大 60 min 雨强 (mm/h)	福建省
吴素业等 ^[15]	EI_{60} 或 $2.455 E_{60} I_{60}$	I_{60} 为次降雨最大 60 min 雨强 (mm/h); E_{60} 为次降雨最大 60 min 雨强对应的降雨动能 (MJ/hm^2)	安徽省大别山
杨子生 ^[16]	$E_{60} I_{30}$	E_{60} 为次降雨最大 60 min 雨强对应的降雨动能, (MJ/hm^2); I_{30} 为次降雨最大 30 min 雨强 (mm/h)	滇东北山区
刘文耀 ^[17]	EI_{15}	I_{15} 为次降雨最大 15 min 雨强 (mm/h)	云南省昭通盆地
马良等 ^[18]	EI_{30}	I_{30} 为次降雨最大 30 min 雨强 (mm/h)	江西省德安县
刘宝元等 ^[19]	EI_{30}	I_{30} 为次降雨最大 30 min 雨强 (mm/h)	北京市
顾璟冉等 ^[20]	EI_{60}	I_{60} 为次降雨最大 60 min 雨强 (mm/h)	黔西高原

注: E 为次降雨总动能 (MJ/hm^2)。

2 侵蚀性降雨标准

在研究降雨侵蚀力指标过程中发现,不是所有的降雨都会引起土壤侵蚀,因此,为区分降雨是否引起土壤侵蚀引入了侵蚀性降雨标准。Wischmeier 等^[21]首次提出侵蚀性降雨标准为 12.7 mm,但如果 15 min 内降雨量达到 6.4 mm,则该次降雨也为侵蚀性降雨。但 Wischmeier 等^[21]并没有交代确定该侵蚀性降雨标准的方法。而目前而言,国内研究侵蚀性降雨标准的方法主要基于裸露小区资料,并结合王万忠等^[22]的频率分析法和回归分析法或谢云等^[23]的以漏选和多选降雨事件的降雨侵蚀力相等为原则,用偏差系数最小时对应的次降雨量求取雨量标准的方法。许多学者基于这两种方法拟定了各地区侵蚀降雨标准,具体详

见表 2。由表 2 可知,中国大部分地区侵蚀性降雨量标准主要在 8.9~14.0 mm 范围内,且多数成果仅以降雨量作为侵蚀性降雨标准,而采用降雨量和最大 30 min 雨强标准同时作为侵蚀性降雨标准的情况下,最大 30 min 雨强时段的雨量标准相差较大。此外,刘和平等^[24]拟定的北京侵蚀降雨量标准以及张兴刚等^[25]根据 31 场次降雨数据拟合侵蚀性降雨量标准偏高,可能是土壤性质、计算方法不同或采用的样本数较少,导致研究结果存在较大的误差。以江西省德安红壤区为例,尹忠东等^[26]、郑海金等^[27]、马良等^[28]采用的样本数不同得出的结论相差较大,侵蚀性雨量标准分别为 14.0, 9.97, 11.2 mm。金建君等^[29]研究表明足够多的样本数才能保证雨量标准的稳定性,同时发现 5 a 序列的观测资料可满足拟定侵蚀性雨量标准

的要求。而刘和平等^[24]研究表明样本数达到 7 a 时, 所拟定的降雨量标准才能稳定。因此, 样本数在侵蚀性降雨标准拟定中具有重要的作用。

国内众多研究成果以降雨量 12.0 mm 为侵蚀性降雨标准得到较多学者认同, 并得到广泛应用^[30-32]。但是, 侵蚀降雨量的不确定性以及依靠单一的降雨量作为侵蚀性降雨标准, 或将降雨量和雨强结合拟定侵蚀性降雨标准而两个标准又不能有效的结合在一起, 导致无法准确区别侵蚀性降雨, 进而达到提高土壤侵

蚀预报的精度^[33]。为此, 孙正宝等^[33]据自然降雨及其引发土壤侵蚀是一个连续变化的过程的特点, 提出基于模糊逻辑下精细的表达和识别侵蚀性降雨的模糊隶属度模型。但该模型在一个研究区域内率定的参数仅适用于相应的研究区, 当模型运用于不同的研究区域时, 需要对所选的参数重新率定。因此, 区域侵蚀性降雨标准的确定应选择合适的方法并结合地区的降雨特性、水土保持措施等进一步深入研究。

表 2 中国学者提出的侵蚀性降雨标准汇总

来源	代表性土壤	侵蚀性降雨标准/mm		研究地区
		P	I_{30} 标准	
王万忠 ^[22]	黄土	9.9	7.2	黄河流域子洲
江忠善等 ^[34]	黄土	10.0	7.5	甘肃省西峰市
高峰等 ^[35]	黑土	8.9	8.0	黑龙江省宾县
陈法扬等 ^[14]	红壤	9.4		广东省小良镇
张奇 ^[34]	紫色土	8.9	10.7	四川省紫色丘陵区
张宪奎等 ^[13]	黑土、白浆土	9.8		黑龙江省
杨子生 ^[16]	—	9.2		滇东北山区
Xie 等 ^[36]	黄土	12.0	6.65	黄河流域子洲
程庆杏等 ^[37]	—	13.6	4.8	皖南山区
尹忠东等 ^[26]	红壤	14.0		江西省德安县
刘和平等 ^[24]	粗骨褐土	18.9	8.9	北京市
郑海金等 ^[38]	红壤	9.97		江西省德安县
马良等 ^[28]	红壤	11.2		江西省德安县
李林育等 ^[39]	紫色土	11.3		四川省紫色丘陵区
张兴刚等 ^[25]	棕壤	17.3		山东省药乡小流域

注: 表中 P 为次降雨量; I_{30} 标准为 30 min 最大降雨时段的雨量标准; “—”表示参考文献中无涉及到研究区域的土壤类型。

3 降雨侵蚀力 R 值的简易计算模型

EI_{30} 是降雨侵蚀力的经典计算模型, 其在中国应用准确性也得到我国众多学者的验证。然而, 由于利用该模型计算时, 涉及到的连续记录降雨过程资料不容易获得, 在实际应用中还是受到一定限制。基于此, 朱强等^[40]结合 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 卫星 3B42 降雨资料提出了 EI_{30} 的改进算法(简称朱强模型), 其模型根据 3 h 雨强数据计算降雨侵蚀力, 同时采用地区实测日降雨量对 TRMM 卫星降雨资料进行验证, 发现 TRMM 卫星数据具有一定精度。该方法在一定程度上避免了降雨实测资料的不足, 但目前还需根据降雨侵蚀力 EI_{30} 法的实测值对 TRMM 卫星数据估算降雨侵蚀力进行验证。也有研究^[41]表明, TRMM 数据中降水资料是根据云量进行估算的, 在少雨期的降水估计值可能偏高。朱强模型计算公式为:

$$R_c = [0.29 - 0.2088 \exp(-0.082i_{avr})] P_r I_{180} \quad (1)$$

式中: R_c ——次降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$]; i_{avr} ——TRMM 资料中 3 h 平均雨强 (mm/h); P_r ——次降雨量 (mm); I_{180} ——TRMM 资料中的最大 180 min 雨强 (mm/h)。

此外, 国内外学者依据日常降雨资料, 建立了多种降雨侵蚀力的简易计算模型, 包括次降雨模型、日降雨模型、月降雨模型、季降雨模型、年降雨模型等, 具体详见表 3。在这些模型中, 采用对数函数形式的季降雨模型考虑了降雨的季节性差异, 但可能由于各季节的模型精度不一使其运用受到限制。而以 Richardson 等^[42]建立的幂函数结构形式为代表的日降雨模型优于其余模型而得到更广泛应用。其中, Yu 等^[43]对 Richardson 等^[42]的日降雨模型的修正模型在国内外得到一定的运用^[44-45]。而在我国章文波等^[32]结合 Richardson 等^[42]的日降雨模型和谢云等^[46]提出的用日雨量和日雨强计算半月侵蚀力的简易方法来估算半月时段的 R 值为基准值建立了日降雨模型(简称章文波模型), 该模型在全国尺度范围有一定的精

度,已被应用于中国土壤流失方程^[47]中,且已完成全国第一次水利普查水力侵蚀专项普查工作,同时被众多学者运用于地区降雨侵蚀力的研究^[41,48-50]。但建立各模型采用的方法和降雨资料不尽相同,使得每个模型都有其适用尺度和范围^[51]。特别是我国区域辽阔,气候条件方面东西南北差异明显。以章文波模型为例,钟莉娜等^[52]采用章文波模型研究陕北黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力分布特征发现,章文波模型估算值与 EI_{30} 计算值存在一定差异,并将其修正为:

$$R=0.849R_{zhang}-29.651 \quad (2)$$

式中: R ——月降雨侵蚀力的 EI_{30} 计算值 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; R_{zhang} ——月降雨侵蚀力的章文波模型计算值 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$ 。该修正模型大大提高了章文波模型在区域运用中的精度。说明在运用现有的降雨侵蚀力简易计算模型时需要考虑研究区域是否适用,是否需要修正。

简易计算模型的建立不仅避免了次降雨资料的不足和 R 值计算过程繁琐,也促进了未来降雨侵蚀力

的预测研究。通过未来不同情景下全球气候模式或区域气候模式输出数据后经时空尺度转换得到的日、月、年降雨资料和已有的简易模型可估算未来降雨侵蚀力。以黄河流域为例,Zhang 等^[53]结合 HadCM3 模式和年降雨模型研究发现,该流域降雨侵蚀力在未来几十年有明显上升趋势,且东南部比西北部上升趋势更明显。此外,刘灵^[54]利用 CMIP 全球气候模式和黄炎和等^[10]建立的简易模型预测了江西省降雨侵蚀力,得出未来 20 a 江西省东南部降雨侵蚀力有上升趋势,而其他大部分地区均有下降趋势。但这种预测方法存在局限性。因为已有的简易模型是根据历史的区域降雨资料建立的,而据 2014 政府间气候变化专门委员会(IPCC)综合报告,到 21 世纪末高海拔地区和赤道太平洋区的年降雨量是增加的;低海拔大陆区和湿热地区地区的极端降雨事件将更加频繁。因此,在全球气候变化背景下,已有的简易模型是否适用于预测未来降雨侵蚀力需要进行论证,而不是直接运用。

表 3 中国学者提出的降雨侵蚀力 R 值的简易计算模型汇总

模型	来源	方程	参数	应用范围
次降雨模型	章文波等 ^[55]	$R_c=0.1773P_rI_{10}$	R_c 为次降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_r 为次降雨量 (mm) ; I_{10} 为次降雨的最大 10 min 雨强 (mm/h)	中国
	Lal ^[56]	$R_c=P_rI_{7.5}$	R_c 为次降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_r 为次降雨量 (mm) ; $I_{7.5}$ 为次降雨最大 7.5 min 雨强 (mm/h)	西非尼日利亚
	郑海金等 ^[29]	$R_c=0.2088P_r^{1.732}$	R_c 为次降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_r 为次降雨量 (mm)	江西省德安县
	刘宝元等 ^[21]	$R_c=0.2463P_rI_{30}$	R_c 为次降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_r 为次降雨量 (mm) ; I_{30} 为次降雨的最大 30 min 雨强 (mm/h)	北京市
	林金石等 ^[57]	$R_c=0.0518P_r^2+2.5406P_r+9.7323$	R_c 为次降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_r 为次降雨量 (mm) ,且 $\rho>12.7$ mm	江西省鹰潭市
顾琛冉等 ^[22]	$R_c=0.344P_rI_{60}$	R_c 为次降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_r 为次降雨量 (mm) ; I_{60} 为次降雨的最大 60 min 雨强 (mm/h)	黔西高原	
日降雨模型	Yu 等 ^[43]	$R_j=\alpha[1+\gamma\cos(2\pi fj+\omega)]\sum_{k=1}^N P_{d_j}^k$ $P_d>P_0$	R_j 为 j 月份降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_d 为日降雨量 (mm) ; P_0 为临界降雨量 (mm) ; N 为年降雨量超过临界降雨量的天数 (d) ; $\alpha, \beta, \gamma, \omega, f$ 为模型参数	澳大利亚南部、新南威尔士州
	谢云等 ^[46]	$R_j=0.184\sum_{j=1}^k(P_dI_{10d})$	R_j 为半月降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_d 为 ≥ 12 mm 的日降雨量 (mm) ; I_{10d} 为日 10 min 最大雨强 (mm/h) ; k 为半月内的天数 (d) ; j 为日序号	中国
	郭新波等 ^[58]	$R_j=0.0043\left[\frac{\pi}{12}(j-1)\right]\sum_{k=1}^N P_{d_j}^{k-0}$ $P_d>P_0$	R_j 为 j 月份降雨侵蚀力; P_d 为日降雨量 (mm) ; P_0 为临界降雨量 $(12.7$ mm); N 为月内大于临界降雨量的天数 (d) ; j 为月序	浙江省红壤区
	章文波等 ^[32]	$R_j=\alpha\sum_{j=1}^k(P_d)^{\beta}$ $\beta=0.8363+\frac{18.177}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}}$ $\alpha=21.586\beta^{-7.1891}$	R_j 为半月的侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; k 为半月时段内的日数 (d) ; P_d 为日雨量 (mm) ($P_d\geq 12$ mm); λ 和 β 是模型参数; P_{d12} 为日雨量 ≥ 12 mm 的日平均雨量 (mm) ; P_{y12} 为日雨量 ≥ 12 mm 的年平均雨量 (mm)	中国
	马良等 ^[20]	$R_d=0.238P_d^{810}$	R_d 为日降雨侵蚀力 $[J \cdot mm/(m^2 \cdot h)]$; P_d 为日降雨量 (mm)	江西省
史志华等 ^[59]	$R_j=0.429\left\{1+0.328\sin\left[\frac{\pi}{12}(j-1)\right]\right\}\sum_{k=1}^N P_{d_j}^{k-1}$ $P_d>P_0$	R_j 为 j 月份降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_d 为日降雨量 (mm) ; P_0 为临界降雨量 $(12$ mm); N 为一个月内大于临界降雨量的天数 (d) ; j 为月序	武汉市	
刘宝元等 ^[21]	$R_d=0.2411P_dI_{30d}$	R_d 为日降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_d 为日降雨量 (mm) ; I_{30d} 为日最大 30 min 雨强 (mm/h)	北京市	
Xie 等 ^[60]	$R_d=0.3522P_d(P_{60\min})_d$	R_d 为日降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; P_d 为日降雨量 (mm) ; $(P_{60\min})_d$ 为日最大 60 min 雨量 (mm)	中国	

续表 3

月 降 雨 模 型	Wisheimer 等 ^[23]	$R_y = \sum_j^{12} 1.735 \times 10^{1.51 \lg \frac{P_j^2}{R_y}} - 0.8188$	R_y 为年降雨侵蚀力; P_j 为第 j 月降雨量(mm); P_y 为年降雨量(mm)	美国
	马志尊 ^[61]	$R_y = 1.2157 \sum_j^{12} 10^{1.51 \lg \frac{P_j^2}{R_y}} - 0.8188$	R_y 为年降雨侵蚀力; P_j 为第 j 月降雨量(mm); P 为年降雨量(mm)	海河流域太行山区
	黄炎和等 ^[10]	$R_y = \sum_j^{12} 0.0199 P_j^{1.5682}$	R_y 为年降雨侵蚀力; P_j 为各月大于 20 mm 的月降雨量(mm)	闽东南地区
	Renard 等 ^[62]	$R_y = aF^b \quad F = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{P_j}{P_y} \right)$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); F 为修正 Fournier 指数; P_y 为年降雨量(mm); P_j 为第 j 月降雨量(mm); a, b 为模型参数	美国
	吴素业 ^[17]	$R_y = \sum_j^{12} 0.0125 P_j^{1.6296}$	R_y 为年降雨侵蚀力(J/m^2); P_j 为第 j 月降雨量(mm)	安徽省大别山
	周伏建等 ^[11]	$R_y = \sum_j^{12} (-2.6398 + 0.3046 P_j)$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{J} \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_j 为第 j 月降雨量(mm)	福建省
	Fu 等 ^[63]	$R_y = 8.3462 P_9^{1.2570}$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_9 为每月中日降雨量大于 9 mm 相应的降雨量之和(mm)	黄河流域
季 降 雨 模 型	郑海金等 ^[29]	$R_y = \sum_j^{12} 0.3127 P_j^{1.4942}$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_j 为月降雨量(mm)	江西省德安县
	Hoyos 等 ^[64]	$\lg R_{\text{dry}} = 1.3991 \lg P_{\text{dry}} - 0.365$ $\lg R_{\text{wet}} = 1.6011 \lg P_{\text{wet}} - 0.967$	$R_{\text{dry}}, R_{\text{wet}}$ 为干、湿季节降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); $P_{\text{dry}}, P_{\text{wet}}$ 为干、湿季节降雨量(mm)	哥伦比亚安第斯山脉
	Kavian 等 ^[65]	$\lg R_c = 1.0599 \lg P_c + 0.3255$	$R_c, R_x, R_q, R_d, R_{\text{dry}}, R_{\text{wet}}$ 为春、夏、秋、冬、干、湿季节降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); $P_c, P_x, P_q, P_d, P_{\text{dry}}, P_{\text{wet}}$ 为春、夏、秋、冬、干、湿季节降雨量(mm)	伊朗东北部
		$\lg R_x = 1.1028 \lg P_x + 0.3837$		
		$\lg R_q = 1.138 \lg P_q + 0.1864$		
		$\lg R_d = 1.2654 \lg P_d - 0.1987$		
		$\lg R_{\text{dry}} = 1.0904 \lg P_{\text{dry}} + 0.3265$ $\lg R_{\text{wet}} = 1.2481 \lg P_{\text{wet}} - 0.0994$		
Renard 等 ^[62]	$R_y = 0.04830 P_y^{1.610} \quad P_y < 850$ $R_y = 587.8 - 1.219 P_y + 0.004105 P_y^2 \quad P_y \geq 850$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_y 为年雨量(mm)	美国	
Foster 等 ^[66]	$R_y = 0.276 P_y I_{30}$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{J} \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_y 为年雨量(mm); I_{30} 为次降雨最大 30 min 雨强(mm/h)	北美洲	
Mikhailova 等 ^[67]	$R_y = 699.3 + 7.0001 P_y - 2.7190 E$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_y 为年雨量(mm); E 为海拔高度(m)	美洲洪都拉斯	
Zhang 等 ^[55]	上游: $R_y = 1.0841 P_y^{1.3683}$ 中下游: $R_y = 5.3595 P_y^{1.2396}$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_y 为年雨量(mm)	黄河流域	
Bonilla 等 ^[68]	$R_y = 0.238 P_y^{1.534}$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_y 为年雨量(mm)	智利	
Lee 等 ^[69]	$R_y = 5.86 P_y - 1.715$	R_y 为年降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); P_y 为年雨量(mm)	韩国	

4 降雨侵蚀力时空分布

降雨侵蚀力时空分布规律定量研究是进行土壤侵蚀预报的基础。降雨侵蚀力的时间分布规律一定程度上反映了全球气候变化给土壤侵蚀带来的影响,而其空间分布反映了不同区域气候对土壤侵蚀的作用。近 20 a 来,国内外众多研究在区域降雨侵蚀力时空分布变化方面取得了一定的成果。表 4 中主要呈现了全球范围内各区域降雨侵蚀力 R 值的变化规律。从表 4 可以看出,不管是流域尺度还是国家尺度,降雨侵蚀力 R 值年际变化较大,且空间分布不均匀。降雨侵蚀 R 值呈明显的地带性和季节性差异。全球范围来看,不同气候带 R 值存在较大差异,热带气候区 R 均值最高,其次是温带,寒冷地区最低;不同季节而言,夏季 R 值最高,其次春、秋季,而冬季最低;内陆与沿海对比来看,沿海地区 R 值往往比内陆大。此外,全球大部分地区降雨侵蚀力呈现上升趋势,特别沿海

地区。这与当前全球气候变化背景下极端气候出现频率增加以及沿海地区的地理位置和气候类型有着密切联系。据研究^[70],热带太平洋的厄尔尼诺和热带大气中的南方涛动(简称 ENSO)对降雨侵蚀力表现在降雨侵蚀力与赤道太平洋中东部海洋表面温度距平值、南方涛动指数、多变量 ENSO 指数均存在呈现显著相关。

5 存在问题及研究展望

结合国内外的研究成果,降雨侵蚀力的研究还存在一定的不足。(1) 缺乏较为统一的侵蚀性降雨标准体系。由于区域的气候类型和土壤性质等差异,不同区域侵蚀性降雨标准也存在差异。但由于未建立统一的侵蚀性降雨标准,一个区域 R 值计算模型被运用到另一个区域时其侵蚀性降雨标准很少得到论证,甚至大部分月、年降雨模型并没有说明侵蚀性降雨标准。

表 4 降雨侵蚀力 R 值的时空分布特征汇总

来源	研究年限	研究地区	计算方法	主要变化特征
章文波等 ^[71]	1971—1998	中国	章文波模型	R 值在 51.50~32 034.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内, R 值较小的地区对应 R 值的年内分配非常集中;大部分地区年 R 值际变化表现出上升的趋势,江西和湖南等交界等地上升趋势明显
Meusburger 等 ^[72]	—	瑞士	EI_{30}	R 值在 124.00~5 611.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 1 330.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a); R 值年内分布为 7,8 月最高,而冬季最低;各站 5—10 月 R 值均有明显上升趋势
Huang 等 ^[73]	1960—2005	长江流域	章文波模型	R 值在 131.21~16 842.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 5 646.50 MJ·mm/(hm ² ·h·a);大部分地区年 R 值呈上升趋势,特别是金沙江流域和鄱阳湖流域;夏、冬季 R 值上升趋势明显
Sadeghi 等 ^[74]	1970—1992	伊朗	EI_{30}	R 值在 21.00~1 152.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 123.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a);除 8 月、10 月外,其他月份 R 值均有下降趋势,其中 6 月、11 月有明显的下降趋势;总体来看,年 R 值有下降趋势
赖成光等 ^[34]	1960—2012	珠江流域	章文波模型	R 值在 1 858.00~14 656.60 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 7 177.10 MJ·mm/(hm ² ·h·a);总体呈从东到西逐渐递减的规律,年、季节、汛期和非汛期 R 值变化趋势均不显著,均没有发生显著的突变,其中春、秋两季 R 值呈下降趋势,其余时间段呈上升趋势;大部分地区年 R 值呈上升的趋势
Gu 等 ^[49]	1960—2012	云南省	章文波模型	R 值在 1 066.35~14 209.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 4 382.65 MJ·mm/(hm ² ·h·y),主要集中在夏、秋两个季节;年均及秋季 R 值在西部有上升趋势而在东部有下降趋势;冬季 R 值在东部有上升趋势而在西部有下降趋势
Panagos 等 ^[75]	—	欧盟和瑞士	EI_{30}	R 值在 246.00~3 094.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 722.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a),式中:地中海和高山地区最高,而北欧国家最低
Wu 等 ^[76]	1971—2013	黄土高原沿河流域	章文波模型	R 均值为 1 929.43 MJ·mm/(hm ² ·h·a);主要集中在 5—10 月,其他月份几乎为 0;年均 R 值呈现下降趋势;流域的中、南部 R 值最高
Borrelli 等 ^[77] (2016)	—	意大利	EI_{30}	R 值在 216.90~6 939.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 1 715.20 MJ·mm/(hm ² ·h·a);年降雨侵蚀力 R 值空间变异较大,西北部 R 值最高
Qin 等 ^[78]	1951—2010	中国大陆	章文波模型	R 值在 30.70~30 051.10 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 2 434.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a);呈西北部低而东南部高分布;南方红壤丘陵区和西南喀斯特地区年 R 值有明显的上升趋势,而西北黄土高原地区、东北黑土区有明显的下降趋势
Panagos 等 ^[79]	—	希腊	EI_{30}	R 值在 84.00~2 825.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 807.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a);西部和伯罗奔尼撒半岛 R 值变异程度较高,而西马其顿、塞萨利、阿提卡和基克拉泽群岛 R 值变异程度较低;夏季东、西部 R 值梯度分布较为平缓,但冬季非常明显
柴雪柯等 ^[80]	1985—2013	渭河流域	章文波模型	R 值在 1 000.00~3 600.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 2 045.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a);由东南向西北递减;在年内呈单峰型分布,6—9 月占年侵蚀力的 70%左右;20 世纪 80 年代以来呈现出下降趋势
Panagos 等 ^[81]	—	全球	EI_{30}	R 均值为 2 190.00 MJ·mm/(hm ² ·h·a);在东南亚(柬埔寨、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾和孟加拉国)、中非(刚果和喀麦隆)、南美洲(巴西、哥伦比亚和秘鲁)、非美洲和加勒比等最高,在西伯利亚、中东、北非、加拿大和北欧最低。热带气候区 R 均值最高,其次是温带,寒冷地区最低
彭洁等 ^[82]	2010	巴基斯坦	朱强模型	R 值在 0.58~5 929.85 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 524.15 MJ·mm/(hm ² ·h·a);整体上呈现出东部高西部低的空间格局,且高值区主要分布在伊斯兰堡、门盖拉镇、锡亚尔科特—拉合尔—萨希瓦尔沿线,以及卡拉奇等城镇附近区域
钟科元等 ^[83]	1960—2014	松花江流域	章文波模型	R 值在 806.70~3 504.3 MJ·mm/(hm ² ·h·a)内,均值为 1 717.60 MJ·mm/(hm ² ·h·a);自东南向西北递减,与东南季风的影响区域相吻合;在西北地区年 R 值呈增加趋势,而在中部平原区的东北部和西南部呈现下降趋势;年 R 值在地形上呈现为:东部丘陵山区>中部平原区>西部山区

注:表中“—”表示研究区域内各站点数据年限不一致。

(2) 已有的降雨侵蚀力简易计算模型存在一定的局限性。一方面已有的简易计算模型具有区域性差异,而针对全国性的简易计算模型也难以准确计算

地区降雨侵蚀力;另一方面已有的简易计算模型运用于预测未来降雨侵蚀力尚未论证其模型的适用性。

(3) 缺乏对降雨侵蚀力影响因素的研究。虽然

在气候变化发现热带太平洋的厄尔尼诺和热带大气中的南方涛动对降雨侵蚀力具有一定影响,但其影响机制还有待研究。而且目前全球气候变化下极端气候出现频率增加对区域降雨侵蚀力的影响也报道较少。因此,可结合区域历史降雨资料与标准径流小区资料,利用统一的研究方法建立各个区域的侵蚀性降雨标准,为建立区域降雨侵蚀力模型和准确计算趋势降雨侵蚀力奠定基础。而对于已有的降雨侵蚀力简易模型,应结合历史资料进行验证或修正,也可以尝试建立新的简易模型,比如不同等级降雨的侵蚀力简易计算模型。此外,降雨侵蚀力的研究可在历史监测资料基础上,结合遥感估算法、气候模型等方式开展气候变化对降雨侵蚀力的影响研究,并预测不同气候变化情景下区域降雨特征的变化,为未来气候变化情景下区域水土流失防治措施的制定提供科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1959,23(3):246-249.
- [2] 哈德逊. 土壤保持[M]. 窦葆璋,译. 北京:科学出版社, 1976:50-54.
- [3] Foster G R, Lombardi F, Moldenhauer W C. Evaluation of rainfall-runoff erosivity factors for individual storms [J]. Transactions of the ASABE, 1982,25(1):124-129.
- [4] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [5] Brown L C, Foster G R. Storm erosivity using idealized intensity distributions[J]. Transactions of the ASABE, 1987,30(2):379-386.
- [6] 江忠善,宋文经,李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持,1983(3):34-38.
- [7] 刘素媛,聂振刚. 辽西低山丘陵半干旱地区天然降雨雨滴特性研究初报[J]. 中国水土保持,1988(2):17-19.
- [8] 黄炎和,卢程隆,郑添发,等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J]. 水土保持学报,1992,6(4):1-5.
- [9] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报,1995,1(9):13-18.
- [10] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究(II):降雨侵蚀力指标 R 值的探讨[J]. 水土保持通报, 1983,3(5):62-64.
- [11] 贾志军,王小平,李俊义. 晋西黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标 R 值的确定[J]. 中国水土保持,1987(6): 20-22.
- [12] 姚治君,廖俊国,陈传友. 云南玉龙山东南坡降雨因子与土壤流失关系的研究[J]. 自然资源学报,1991,6(1): 45-54.
- [13] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报,1992,12(4):1-9.
- [14] 陈法扬,王志明. 通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用[J]. 水土保持通报,1992,12(1):23-41.
- [15] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J]. 中国水土保持,1994(4):12-13.
- [16] 杨子生. 滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究[J]. 地理科学,1999,19(3):74-79.
- [17] 刘文耀. 云南昭通盆地降雨侵蚀性与土壤可蚀性的初步研究[J]. 云南地理环境研究,1999,11(2):76-82.
- [18] 马良,姜广辉,左长清,等. 江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(10): 61-68.
- [19] 刘宝元,毕小刚,符素华,等. 北京土壤流失方程[M]. 北京:科学出版社,2010,36-48.
- [20] 顾璟冉,张兴奇,顾礼彬,等. 黔西高原地区降雨侵蚀力的简易算法[J]. 水土保持通报,2016,36(2):204-208.
- [21] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide for Conservation Planning[M]. Washington DC: USDA,1978:5-8.
- [22] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究(III):关于侵蚀性降雨的标准问题[J]. 水土保持通报, 1984,15(2):58-63.
- [23] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [24] 刘和平,袁爱萍,路炳军,等. 北京侵蚀性降雨标准研究 [J]. 水土保持研究,2007,14(1):215-217.
- [25] 张兴刚,王春红,程甜甜,等. 山东省药乡小流域侵蚀性降雨分布特征[J]. 中国水土保持科学,2017,15(1): 128-133.
- [26] 尹忠东,左长清,周心澄. 江西省北部燕沟小流域降雨侵蚀力研究[J]. 人民长江,2005,36(7):55-56.
- [27] 郑海金,方少文,杨洁,等. 赣北第四纪红壤坡地降雨侵蚀力的计算与分析[J]. 中国水土保持科学,2010,8(2): 36-40.
- [28] 马良,左长清,邱国玉. 赣北红壤坡地侵蚀性降雨的特征分析[J]. 水土保持通报,2010,30(1):74-79.
- [29] 金建君,谢云,张科利. 不同样本序列下侵蚀性雨量标准的研究[J]. 水土保持通报,2001,21(2):31-33.
- [30] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学,2002,22(6):705-711.
- [31] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. 地理研究,2013,32(2):245-256.
- [32] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等. 珠江流域 1960—2012 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 农业工程学报,2015,31 (8):159-167.
- [33] 孙正宝,陈治谏,廖晓勇,等. 侵蚀性降雨识别的模糊隶属度模型建立及应用[J]. 水科学进展,2011,22(6): 801-806.

- [34] 江忠善,李秀英. 黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):40-45.
- [35] 高峰,詹敏,战辉. 黑土区农地侵蚀性降雨标准研究[J]. 中国水土保持,1989(11):21-23.
- [36] Xie Yun, Liu Baoyuan, Nearing M A. Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms [J]. Transactions of the ASABE, 2002,45(6):1843-1847.
- [37] 程庆杏,吕万民,吴百林. 土壤侵蚀的雨量标准研究初报[J]. 中国水土保持科学,2004,2(3):90-92.
- [38] 郑海金,杨洁,左长清,等. 红壤坡地侵蚀性降雨及降雨动能分析[J]. 水土保持研究,2009,16(3):30-33.
- [39] 李林育,王志杰,焦菊英. 紫色丘陵区侵蚀性降雨与降雨侵蚀力特征[J]. 中国水土保持科学,2013,11(1):8-16.
- [40] 朱强,陈秀万,樊启祥,等. 基于 TRMM 的降雨侵蚀力计算方法[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(11):1483-1492.
- [41] 王晓云,史明昌,胡影,等. TRMM 数据应用于降雨量和降雨侵蚀力估算的适宜性研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(1):129-133.
- [42] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. Transactions of the ASAE, 1983,26(1):153-156.
- [43] Yu B, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales[J]. Australian Journal of Soil Research, 1996,34(1):139-152.
- [44] Lai Chengguang, Chen Xiaohong, Wang Zhaoli, et al. Spatio-temporal variation in rainfall erosivity during 1960—2012 in the Pearl River Basin, China[J]. Catena, 2016,137:382-391.
- [45] Ma Xing, He Yandong, Xu Jianchu, et al. Spatial and temporal variation in rainfall erosivity in a Himalayan watershed [J]. Catena, 2014,121:248-259.
- [46] 谢云,章文波,刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报,2001,21(6):53-56.
- [47] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation[C]//International Soil Conservation Organization Conference(II). Beijing: Tsinghua University Press. 2002:26-31.
- [48] 张照录,薛重生. 三峡库区日降雨量侵蚀力模型公式[J]. 人民长江,2005,36(11):17-19.
- [49] Gu Zhijia, Duan Xingwu, Liu Bing, et al. The spatial distribution and temporal variation of rainfall erosivity in the Yunnan Plateau, Southwest China: 1960—2012 [J]. Catena, 2016,145:291-300.
- [50] 付金霞,张鹏,郑粉莉,等. 河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J]. 农业机械学报,2016,47(2):185-192.
- [51] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover[J]. Catena, 2005,61(2/3):131-154.
- [52] 钟莉娜,王军,赵文武. 基于修正简易模型的陕北黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力分布特征[J]. 中国水土保持科学,2016,14(5):8-14.
- [53] Zhang Guanghui, Nearing M A, Liu Baoyuan. Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River basin of China[J]. Transactions of the ASABE, 2005,48(2):511-517.
- [54] 刘灵. 全球气候变化背景下江西省降雨侵蚀力研究[D]. 江西 南昌:江西农业大学,2013:46-49.
- [55] 章文波,谢云,刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. 地理研究,2002,21(3):384-390.
- [56] Lal R. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria(III). Effectsof rainfall characteristics[J]. Geoderma, 1976, 16(5):389-401.
- [57] 林金石,张黎明,于东升,等. 我国南方地区降雨侵蚀力特征及简易算法研究:以江西省鹰潭地区为例[J]. 水土保持通报,2011,31(2):112-116.
- [58] 郭新波,王兆骞,张如良. 浙江红壤区降雨侵蚀力季节分布与日雨量模型研究[J]. 水土保持学报,2001,15(3):35-37.
- [59] 史志华,郭国先,曾之俊,等. 武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究[J]. 中国水土保持,2006(1):22-24.
- [60] Xie Yun, Yin Shuiqing, Liu Baoyuan, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. Journal of Hydrology, 2016,535:547-558.
- [61] 马志尊. 应用卫星影像估算通用土壤流失方程各因子值方法的探讨[J]. 中国水土保持,1989(3):26-29.
- [62] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE [J]. Journal of Hydrology, 1994,157(1/4):287-306.
- [63] Fu Bojie, Zhao Wenwu, Chen Liding, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(1):73-85.
- [64] Hoyos N, Waylen P R, Jaramillo A. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes[J]. Journal of Hydrology, 2005,314(1/4):177-191.
- [65] Kavian A, Fathollah N Y, Habibnejad M, et al. Modeling seasonal rainfall erosivity on a regional scale: A case study from northeastern Iran [J]. International Journal of Environmental Research, 2011, 5(4): 939-950.

- [66] Foster G R, Lane L J, Nowlin J D, et al. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas [J]. Transactions of the ASABE, 1981, 24(5):1253-1262.
- [67] Mikhailova E A, Bryant R B, Schwager S J, et al. Predicting rainfall erosivity in Honduras[J]. Soil Science Society of America, 1997, 61(1):273-279.
- [68] Bonilla C A, Vidal K L. Rainfall erosivity in Central Chile[J]. Journal of Hydrology, 2011, 410(1/2):126-133.
- [69] Lee J, Heo J. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea [J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1/2):30-48.
- [70] 陈世发. ENSO 对韶关市 1951—2013 年降雨侵蚀力影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(10):1573-1580.
- [71] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征 [J]. 山地学报, 2003, 21(1):33-40.
- [72] Meusburger K, Steel A, Panagos P, et al. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(1):167-177.
- [73] Huang Jin, Zhang Jinchi, Zhang Zengxin, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1960—2005 in the Yangtze River basin[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(2):337-351.
- [74] Sadeghi S H R, Hazbavi Z. Trend analysis of the rainfall erosivity index at different time scales in Iran[J]. Natural Hazards, 2015, 77(1):383-404.
- [75] Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity in Europe[J]. Science of The Total Environment, 2015, 511:801-814.
- [76] Wu Lei, Liu Xia, Ma Xiaoyi. Spatio-temporal evolutions of precipitation in the Yellow River basin of China from 1981 to 2013[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2016, 16(5):1441-1450.
- [77] Borrelli P, Diodato N, Panagos P. Rainfall erosivity in Italy: A national scale spatio-temporal assessment[J]. International Journal of Digital Earth, 2016, 9(9):835-850.
- [78] Qin Wei, Guo Qiankun, Zuo Changqing, et al. Spatial distribution and temporal trends of rainfall erosivity in mainland China for 1951—2010[J]. Catena, 2016, 147:177-186.
- [79] Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, et al. Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece[J]. Catena, 2016, 137:161-172.
- [80] 柴雪柯, 高鹏, 蒋观滔, 等. 渭河流域降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3):25-28.
- [81] Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):4175.
- [82] 彭洁, 李爱农, 雷光斌, 等. 基于 TRMM 数据的巴基斯坦降雨侵蚀力估算及空间降尺度模拟[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):10-15.
- [83] 钟科元, 郑粉莉. 1960—2014 年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2):278-291.