

鄱阳湖流域日降雨的侵蚀性雨量标准研究

田杏敏¹, 李凤英¹, 何小武¹, 万小星², 吕祥云¹, 方立志¹, 余 彪³

(1.江西农业大学国土资源与环境学院,南昌 330045;

2.江西省水土保持监督监测站,南昌 330009; 3.江西省修水县水土保持局,江西 修水 332400)

摘要: 确定日降雨的侵蚀性雨量标准是提高基于日降雨数据的降雨侵蚀力模型计算精度的重要前提。利用鄱阳湖流域降雨数据,采用最小偏差法,确定该流域日降雨的侵蚀力雨量标准。结果表明:(1)鄱阳湖流域次降雨的侵蚀性雨量标准为 14.0 mm,降雨侵蚀力偏差系数为 1.8%,土壤侵蚀损失率 2.8%,降雨场次错选度为 14.9%。(2)流域内各站点的逐月降雨量均表现为 6 月达到峰值的倒“V”形规律;侵蚀性次降雨中,降雨时间跨越 2 日或以上的类型最多,占总次数的 54.2%。(3)流域日降雨的侵蚀性雨量标准为 10.0 mm,该标准下年均次、日降雨侵蚀力偏差值为 0.11%。

关键词: 鄱阳湖流域; 侵蚀性雨量标准; 日降雨; 降雨侵蚀力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0185-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.026

Study on Daily Erosive Rainfall Standard in the Poyang Lake Basin

TIAN Xingmin¹, LI Fengying¹, HE Xiaowu¹,

WAN Xiaoxing², LÜ Xiangyun¹, FANG Lizhi¹, YU Que³

(1.College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045;

2.Jiangxi Province Supervision Station for Soil and Water Conservation, Nanchang 330009;

3.Xiushui County Soil and Water Conservation Bureau of Jiangxi Province, Xiushui, Jiangxi 332400)

Abstract: Determining the erosive rainfall standard of daily rainfall is an important prerequisite for improving the calculation accuracy of the simple model based on the daily rainfall. The standards of erosive daily rainfall in the Poyang Lake Basin were studied with the method of minimum deviation. The results showed that: (1) The erosive event rainfall standard in Poyang Lake Basin was 14.0 mm, where the coefficient deviation was 1.8%, the loss rate for erosion amount was 2.8% and the mixing index was 14.9%. (2) The monthly rainfall at each station was the highest rainfall in June with an inverted “V” shape; the type of rainfall time spanning two days or more was the most, accounting for 52.4% of the total erosive event rainfall. (3) The erosive daily rainfall standard in the Poyang Lake Basin was 10.0 mm, where the deviation value of the annual average rainfall erosivity between daily and event rainfall was 0.11%.

Keywords: Poyang Lake Basin; erosive rainfall standard; daily rainfall; rainfall erosivity

降雨是引发水力侵蚀的主要动力,降雨侵蚀力则是描述这种动力的重要参数。在自然界中,不是所有的降雨都能导致土壤侵蚀。因此,建立侵蚀性雨量标准,区分侵蚀性降雨和非侵蚀性降雨,一方面可以有效减少计算降雨侵蚀力的工作量,提高工作效率;另一方面也可以提高降雨侵蚀力计算精度,以此提高土壤侵蚀预测精度^[1]。

国内外对于侵蚀性雨量标准的研究成果丰富,但结果差异较大。如 Wischmeier 等^[2]对美国地区

8 000 多个小区数据分析后确定雨量达到 12.7 mm 的降雨为侵蚀性降雨;谢云等^[1]研究得出,黄土高原坡面的侵蚀性雨量标准为 12 mm;刘和平等^[3]利用 7 年观测资料计算出北京市坡耕地和休闲地小区的侵蚀性雨量标准分别为 19,18.9 mm;其他学者^[4-9]计算出的侵蚀性雨量标准在 8.9~23.6 mm。

以上研究成果均为次降雨的侵蚀性雨量标准(简称次雨量标准),主要应用于基于次降雨计算降雨侵蚀力的模型。由于次降雨的降雨过程资料较难获得,

收稿日期:2020-12-01

资助项目:江西省水利厅服务项目“水土流失因子率定和水土保持措施效益定额定测定”(JXZS201811-J004)

第一作者:田杏敏(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:519446265@qq.com

通信作者:何小武(1970—),男,副教授,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:he-xw@163.com

于是衍生出多种基于日降雨量估算降雨侵蚀力的简易模型。如早期研究者 Richardson 等^[10]将 1 日降雨视为 1 次降雨事件,建立了计算降雨侵蚀力的幂函数模型。简易模型多沿用次雨量标准值作为划分日降雨是否发生侵蚀的阈值^[11-15]。然而,日降雨并不等同于次降雨,二者之间也不存在一一对应的匹配关系。对次雨量标准的直接沿用,必然降低降雨侵蚀力估算值的准确性。目前关于日降雨的侵蚀性雨量标准(简称日雨量标准)研究尚处于初级阶段,Xie 等^[16]首次提出了最小偏差法最优化年度日、次降雨侵蚀力,并计算出我国东部地区日雨量标准为 10 mm。

鄱阳湖流域地处我国南方红壤山地丘陵区,为典型的南方红壤水力侵蚀类型区。本文通过研究流域次、日雨量标准,旨在为准确计算鄱阳湖流域及至南方红壤区降雨侵蚀力提供支撑,从而为准确预测区域土壤侵蚀和制定水土保持决策提供依据。

1 材料与方法

1.1 流域概况与资料来源

1.1.1 流域概况 鄱阳湖流域位于长江中下游南岸,位于北纬 24°29′—30°04′,东经 113°34′—118°28′。流域面积 16.2 万 km²,涉及赣、闽、浙、皖、湘等省,其中 96.8%的流域位于江西省境内,与江西省行政区域高度重合^[17]。流域东、南、西三面环山;赣江、抚河、信江、饶河、修河五大河流及环鄱阳湖的小型河流自各方向注入鄱阳湖,形成独特的辐聚水系(图 1)。流域属亚热带湿润季风气候,多年平均气温为 17.9℃,多年平均降水量为 1 632 mm^[18]。

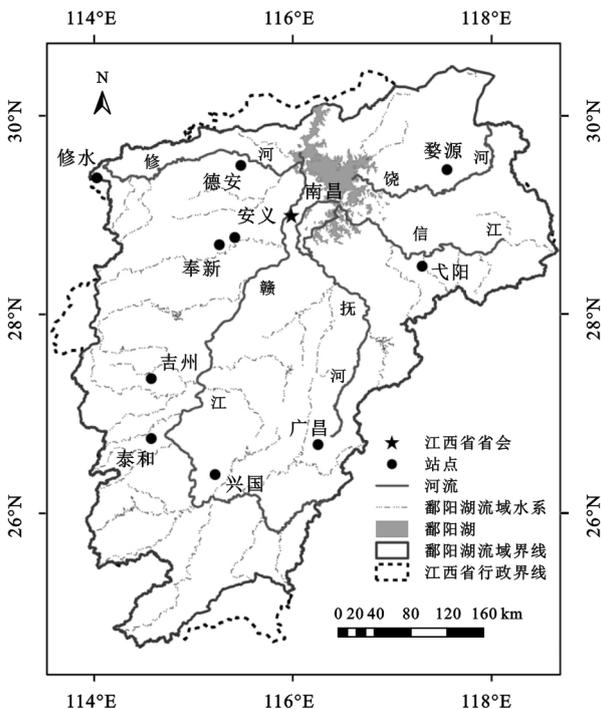


图 1 鄱阳湖流域站点分布

1.1.2 资料来源 数据资料来源于江西省水土保持监督监测站。根据站点数据资料详实、观测时间相对较长等原则,选取流域主要子流域内的 10 个水土保持监测站点坡面径流场标准径流小区共计 49 站年的降雨数据资料,分别用于次、日雨量标准计算分析。各水土保持监测站点的地理位置见图 1,基本情况见表 1。

(1)次雨量标准计算资料。根据金建君等^[19]提出的“数据资料序列达到 5 年及以上即能拟定出稳定的侵蚀性雨量标准”的结论,以及各站点在流域内的分布状况,分别选取修河、博阳河、饶河、赣江等子流域中的安义、德安、婺源、泰和、兴国 5 个站点共计 27 站年数据计算次雨量标准值,使用抚河、信江、赣江、修河等子流域中的广昌、弋阳、吉州、奉新、修水 5 个站点共计 22 站年数据进行验证。

表 1 资料站点数据

站名	所属子流域	经度	纬度	资料年份	年均降水量/mm
安义	修河流域	115°35'31"	28°46'19"	2014—2018	1622.2
德安	博阳河流域	115°41'03"	29°16'05"	2014—2018	1451.6
婺源	饶河流域	117°41'23"	29°12'42"	2013—2018	1897.6
泰和	赣江流域	114°54'00"	26°51'00"	2013—2018	1482.2
兴国	赣江流域	115°16'15"	26°16'45"	2014—2018	1305.8
广昌	抚河流域	116°16'57"	26°45'54"	2017—2018	1366.0
弋阳	信江流域	117°17'31"	28°18'43"	2017—2018	1771.0
吉州	赣江流域	114°54'00"	27°09'00"	2014—2018	1562.0
奉新	修河流域	115°20'33"	28°39'35"	2013—2019	1915.5
修水	修河流域	114°01'57"	29°04'42"	2013—2018	1708.6

(2)日雨量标准计算资料。在选取的数据资料中,仅 5 个站点数据(奉新 2013—2019 年、修水 2017—2018 年、德安 2016—2018 年、兴国 2018 年、广昌 2018 年)具有完整的降雨过程记录。根据以上数据计算日雨量标准。

1.2 研究方法

1.2.1 次雨量标准确定 依据王万忠^[20]提出的频率分析法计算次雨量标准:

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为经验频率值(%); m 为某场降雨所对应的序列号; n 为侵蚀性降雨的总场次。

对于该标准值的准确性,通过降雨场次错选度 $CE(\%)$ 、降雨侵蚀力偏差系数 $DC(\%)$ 和土壤侵蚀损失率 $ELR(\%)$ 3 个指标进行验证。

$$CE = \frac{N_m + N_w}{N_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中: N_m 为发生侵蚀却被漏选的降雨次数; N_w 为未发生侵蚀却被误选的降雨次数; N_t 为全部的降雨次数。

$$DC = \frac{|R_m - R_w|}{R_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_m 为发生侵蚀而被漏选的降雨侵蚀力之和((MJ·mm)/(hm²·h)); R_w 为未发生侵蚀而被误选的降雨侵蚀力之和((MJ·mm)/(hm²·h)); R_t 为总降雨侵蚀力之和((MJ·mm)/(hm²·h))。

$$ELR = \frac{A_m}{A_t} \times 100\% \quad (4)$$

式中: A_m 为在侵蚀性雨量标准下被漏选的土地侵蚀量(t/hm²); A_t 为总的土地侵蚀量(t/hm²)。

采用 RUSLE2 模型中降雨侵蚀力公式计算次降雨的降雨侵蚀力^[21]:

$$e_r = 0.29 \times (1 - 0.72 \exp(-0.082i_r)) \quad (5)$$

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r \cdot P_r) \quad (6)$$

$$R_e = EI_{30} \quad (7)$$

式中: e_r 为每个时段的单位降雨动能(MJ/(hm²·mm)); i_r 为断点雨强(mm/h); P_r 为每个时段的降雨量(mm); E 为每次降雨的总动能(MJ/hm²); I_{30} 为该次降雨的最大 30 min 雨强(mm/h); R_e 为每次降雨的降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm²·h))。

1.2.2 日降雨侵蚀力计算 在完整的 1 日降雨(当日早 8:00 至次日早 8:00)中,可能发生 1 次或多次降雨,也可能仅包含 1 场降雨的部分。次、日降雨关系一般分为 4 种类型,不同类型下的日降雨侵蚀力的计算方法不同^[16]。

类型 I:1 日有且只有 1 次完整降雨,日降雨侵蚀力即为该次降雨的降雨侵蚀力。

$$R_d = R_e = EI_{30} \quad (8)$$

式中: R_d 为日降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm²·h))。

类型 II:1 日内有 2 次或 2 次以上的完整降雨(2 次降雨之间的间隔超过 6 h),日降雨侵蚀力为 2 次或多次降雨的降雨侵蚀力之和。

$$R_d = \sum_{i=1}^n E_i I_{30i} \quad (9)$$

式中: n 为 1 日内的降雨次数; E_i 为第 i 次降雨的总动能(MJ/hm²); I_{30i} 为第 i 次降雨最大 30 min 雨强(mm/h)。

类型 III:1 日内发生不到 1 次降雨,日降雨侵蚀力为该次降雨在该日中实际发生降雨的降雨侵蚀力。

$$R_d = E_{d-d} \cdot I_{30} \quad (10)$$

式中: E_{d-d} 为次降雨在该日内的降雨动能(MJ/hm²)。

类型 IV:上述 3 种类型外的其他一些降雨类型。主要包括:(1)1 日内包括 1 次或多次完整的降雨加另 1 次降雨的一部分;(2)1 日内包括 1 次降雨的一部分加另 1 次降雨的一部分。类型 IV 降雨的降雨侵蚀力通过公式(9~10)计算。

1.2.3 日雨量标准确定 日雨量标准的拟定采用最小偏差法^[16]:

$$R_{\text{year}} = \frac{1}{Y} \sum_{y=1m=1}^Y \sum_{k=1}^M R_e \quad (11)$$

$$R_{\text{dea}} = \frac{1}{Y} \sum_{y=1k=1}^Y \sum_{k=1}^K R_d \quad (12)$$

$$RD = \frac{R_{\text{dea}} - R_{\text{year}}}{R_{\text{year}}} \times 100\% \quad (13)$$

式中: Y 为某站点统计年数; M 为某站点的降雨次数; K 为某站点降雨日数; R_{year} 为某站点的年均次降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm²·h)); R_{dea} 为年均日降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm²·h)); RD 为年均次、日降雨侵蚀力之间的偏差(%)。

2 结果与分析

2.1 次降雨的侵蚀性雨量标准

对试验站点实际产生侵蚀的 753 场次降雨数据分析得出,鄱阳湖流域次雨量标准为 14.0 mm;其降雨场次错选度 CE 值为 13.9%,降雨侵蚀力偏差系数 DC 值为 1.6%,土壤侵蚀损失率 ELR 值为 4.3%;验证站点 627 场次降雨数据验证结果显示, CE 值为 15.9%, DC 值为 2.0%, ELR 值为 1.3%。二者结果差异不大。10 个站点平均 CE 值为 14.9%, DC 值为 1.8%, ELR 值为 2.8%。

2.2 鄱阳湖流域降雨特征

鄱阳湖流域内各站点的逐月降雨量分布见图 2。由图 2 可知,流域内各子流域之间有共同的降雨特征规律:1—6 月的降雨量逐步增加,在 6 月达到峰值,下半年降雨逐渐减少,整体呈倒“V”形变化规律。

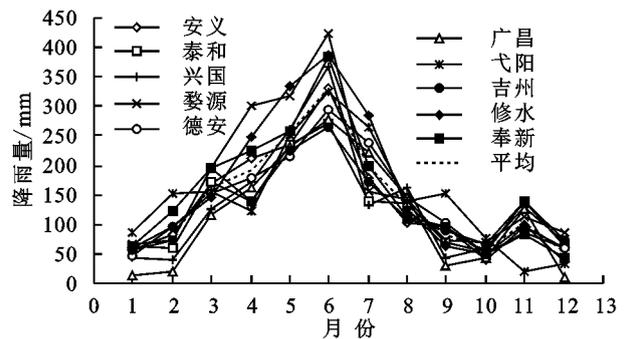


图 2 各站点逐月降雨量分布趋势

统计 49 站年 1211 场侵蚀性次降雨的次、日关系结果见图 3。10 站点的关系类型占比表现为高度一致,仅存在数值上的差异。其中,III 型降雨占比最多,最大值为安义站点,占比为 62.9%,最小值为广昌站点,占比为 45.8%,平均值为 54.2%;其后依次为 I 型、IV 型和 II 型降雨,平均值分别为 38.1%,5.2%,2.5%。

2.3 日降雨的侵蚀性雨量标准确定

研究日雨量标准需要较长时间的降雨资料。为提高数据的可信度和稳定性,现将 14 站年数据视为 1 个整体站点数据进行分析计算。以 14.0 mm 视为日雨量标准模拟值的上限值,逐次降低 0.1 mm。计

算模拟标准下对应的平均年降雨侵蚀力 R_{dea} , 得出对应的 RD 值。计算结果见表 2。由于逐次降低 0.1 mm 的计算数据繁多, 为简便起见, 只取代表性数据列出。

当日雨量标准为 14.0 mm 时, RD 值为 -2.70%。随着日雨量标准模拟值的降低, RD 值逐渐增大。 RD 值在 10.1 mm 与 10.0 mm 时分别为 -0.19% 和 0.11%, 表明在这个模拟范围之间存在 RD 值为 0 的情形, 此时对应的日雨量标准模拟值, 即为日雨量标准值。取整数 10.0 mm 作为日雨量标准值。

表 2 代表性日降雨侵蚀性雨量标准模拟值下的次、日降雨侵蚀力偏差值

R_{yea}	R_{dea}				$RD/\%$				
	14.0 mm	14.0 mm	10.1 mm	10.0 mm	9.9 mm	14.0 mm	10.1 mm	10.0 mm	9.9 mm
8786.7	8549.3	8769.9	8796.4	8796.4	-2.70	-0.19	0.11	0.11	

注: R_{yea} 和 R_{dea} 的单位均为 $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

3 讨论

本研究选取的站点分布于流域南北各处, 具有很好的代表性。依据本研究数据得出的降雨规律与以往长时间序列研究^[22]结果相同, 表明研究的数据系列亦反映出了流域的降雨特征。各站点之间无论是月降雨特征规律, 还是侵蚀性次、日降雨关系特征规律, 均表现出高度的一致性。这是由于各子流域的降雨受到共同的气候环境影响, 每年 3 月下旬或 4 月上旬, 受到东亚热带季风及副热带季风系统共同影响, 进入“江南雨季”的降雨时期^[23], 并持续至 6 月下旬或 7 月上旬, 降雨量占全年的 46% 左右; “江南雨季”结束后即进入盛夏季节, 受西太平洋副热带高压控制和影响, 降雨以局地雷雨或台风影响下的降雨为主, 可持续至 9 月, 降雨量占全年的 24%; 10 月至翌年 3 月受新西伯利亚和蒙古冷高压的共同影响, 表现为低温阴雨天气^[24], 期间的降雨仅占全年的 30%。各站点间一致的降雨特征规律有利于将流域内所有数据资料视为 1 个整体数据, 从而解决确定日降雨侵蚀性雨量标准时的较短时间序列问题。

鄱阳湖流域次雨量标准为 14.0 mm, 与左长清等^[8]对江西省德安县的研究结果一致, 但略高于谢云等^[1]确定黄河流域的标准。较高的 CE 值表明, 漏选和错选的降雨场次比例较高, 这是由于流域内存在一定比例的大雨强小雨量的侵蚀性降雨和小雨强大雨量的非侵蚀性降雨, 这些降雨极易被漏选和错选^[1]。较低的 DC 值则表明, 漏选的降雨侵蚀力基本被误选的降雨侵蚀力抵消, 显示了次雨量标准结果的合理性。低 ELR 值证明了该标准值的准确性。

RD 反映了次、日雨量标准之间降雨侵蚀力的差异。 RD 为负值, 表示在该日雨量标准值下, 年均日降雨侵蚀力小于年均次降雨侵蚀力; 正值则相反。 RD 的绝对值愈大, 二者差异愈大; RD 为 0 时表示

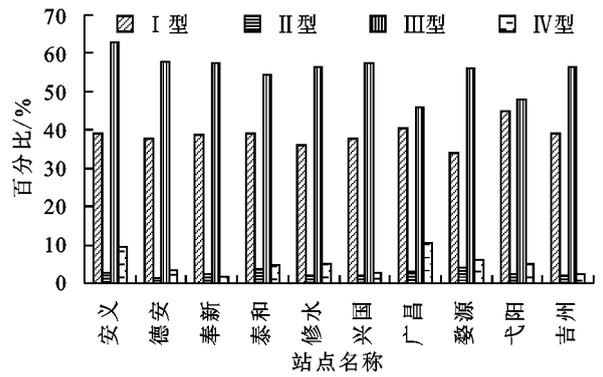


图 3 侵蚀性降雨次、日关系类型

差异为 0。依据计算结果, 日雨量标准应在 10.0~10.1 mm。考虑到计算的便利, 选定 10.0 mm 为日雨量标准值。该结果与 Xie 等^[16]计算出的全国范围内的日侵蚀性雨量标准一致, 也与我国 24 h 降雨量等级划分中的小雨和中雨的临界值 10.0 mm 一致^[25]。4 mm 的差距表明, 次、日雨量标准差异明显, 进一步证明了研究日雨量标准的重要性。

4 结论

(1) 鄱阳湖流域次雨量标准为 14.0 mm。该侵蚀性雨量标准下估算的降雨侵蚀力和实际的降雨侵蚀力误差为 1.8%, 土壤侵蚀损失率为 2.8%, 降雨场次错选度为 14.9%。

(2) 受共同的气候环境作用, 鄱阳湖流域内各子流域降雨的逐月分布及次、日降雨关系特征高度一致。在降雨的逐月分布方面, 总体呈倒“V”形变化趋势, 6 月为每年降雨量最大的月份; 侵蚀性次、日降雨关系中, 跨越 2 日及以上的 III 型最多, 占全部场次的 54.2%, 其次为 1 日只发生 1 次侵蚀性降雨的类型, 占比为 38.1%, IV 型和 II 型降雨的占比分别为 5.2% 和 2.5%。

(3) 鄱阳湖流域日雨量标准为 10.0 mm。该标准值下估算的年均次、日降雨侵蚀力偏差值为 0.11%。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Washington D C: USDA Agricultural Handbook, No. 537, 1978.
- [3] 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, 22(1): 215-217, 220.
- [4] 李华林, 高华端, 赵柯苏, 等. 贵州常态地貌区降雨侵蚀特征分析: 以龙里县羊冲小流域为例[J]. 中国水土保持, 2017, 38(5): 32-35.

- [5] 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,2017,5(1):128-133.
- [6] 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,2013,1(1):8-16.
- [7] 王改玲,王青杵,石生新.晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):1-5.
- [8] 左长清,马良.天然降雨对红壤坡地侵蚀的影响[J].水土保持学报,2005,19(2):1-4,32.
- [9] 贺燕子,岳大鹏,达兴,等.陕北黄土洼聚淤类型划分与侵蚀产沙模拟研究[J].水土保持学报,2017,31(2):87-91,165.
- [10] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount [J]. Transactions of the ASAE American Society of Agricultural Engineers, 1983, 26(1): 153-156.
- [11] Anees M P, Abdullah K, Nawawi M, et al. Development of daily rainfall erosivity model for Kelantan state, Peninsular Malaysia [J]. Hydrology Research, 2018, 49(5): 1434-1451.
- [12] Lee M H, Lin H H. Evaluation of annual rainfall erosivity index based on daily, monthly, and annual precipitation data of rainfall station network in southern Taiwan [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(6): 285-229.
- [13] 范俊甫,何惠馨,郭兵.1980-2015年黄河流域降雨侵蚀力时空变化分析[J].地球信息科学学报,2018,20(2):196-204.
- [14] 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.
- [15] 白云博,王婷,欧阳斯达,等.安徽省1990—2010年降雨侵蚀力分析[J].中国水土保持,2020,41(6):31-33,5.
- [16] 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.
- [17] 鄱阳湖研究编委会.鄱阳湖研究[M].上海:上海科学技术出版社,1988.
- [18] 殷剑敏,苏布达,陈晓玲,等.鄱阳湖流域气候变化影响评估报告[M].北京:气象出版社,2011.
- [19] 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.
- [20] 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,1984,4(2):58-63.
- [21] Foster G R. User's reference guide: Revised universal soil loss equation (RUSLE2) [M]. Washington D C: Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 2004.
- [22] 刘灵.全球气候变化背景下江西省降雨侵蚀力研究[D].南昌:江西农业大学,2013.
- [23] 詹丰兴,何金海,章毅之,等.江南雨季地理区域及起止时间的客观确定[J].海洋学报,2015,37(6):1-11.
- [24] 江西省地方志编纂委员会.江西省志丛书:江西省气象志[M].北京:方志出版社,1997.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 28592—2012 降水量等级[S].北京:中国标准出版社,2012.

(上接第184页)

- [18] 戴雪,万荣荣,杨桂山,等.鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系[J].地理科学,2014,34(12):1488-1496.
- [19] 彭薇.鄱阳湖枯水期水文特征分析及旱限水位研究[D].武汉:长江科学院,2015.
- [20] 土地利用现状分类.国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB/T 21010-2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [21] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近60年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
- [22] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(2): 126-135.
- [23] 侯湖平,张绍良,闫艳,等.基于RS、GIS的徐州城北矿区生态景观修复研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(4):504-510.
- [24] Gao P, Li P F, Zhao B L, et al. Use of double mass curves in hydrologic benefit evaluations [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(26): 4639-4646.
- [25] Zhao G J, LI E H, MU X M, et al. Changing trends and regime shift of streamflow in the Yellow River basin [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(5): 1331-1343.
- [26] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [27] 丁永建,刘时银,叶柏生,等.近50a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析[J].冰川冻土,2006,28(5):623-632.
- [28] 刘纪远,张增祥,庄大方,等.20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J].地理研究,2003,22(1):1-12.
- [29] 徐羽,钟业喜,冯兴华,等.江西省土地利用变化及其对人类活动的响应[J].水土保持研究,2017,24(1):181-186,193.