

中国水蚀区 5 种典型土壤的侵蚀性降雨阈值比较

王瀛^{1,2}, 杨扬^{1,2}, 刘宝元², 刘瑛娜¹

(1.北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2.北京师范大学 地理科学学部 地理学院, 北京 100875)

摘要: [目的] 准确拟定侵蚀性降雨阈值, 区分侵蚀性与非侵蚀性降雨事件, 为有效减少土壤侵蚀预报的工作量以及区域土壤侵蚀防治提供科学参考。[方法] 在北京市房山区布设中国 5 个水蚀二级区典型土壤休闲小区, 收集各小区 2006—2019 年的产流产沙监测资料, 利用降雨侵蚀力偏差法分析各小区的侵蚀性降雨量(P)和最大 30 min 雨强(I_{30})阈值。[结果] ①相比 P 阈值, I_{30} 在识别侵蚀性降雨方面更为有效。②黑土和褐土小区侵蚀性降雨阈值较高, 二者 P 阈值均为 10.0 mm, I_{30} 阈值均为 10.2 mm/h; 黄土小区次之, 其 P 和 I_{30} 阈值分别为 9.5 mm 和 8.9 mm/h。紫色土与红壤小区较低, 二者的 P 阈值分别为 5.4 和 6.1 mm, I_{30} 阈值分别为 3.2 和 5.2 mm/h。③各径流小区的监测资料年限达到 12 a 时, 侵蚀性降雨阈值才达到稳定。[结论] 不同地区土壤的侵蚀性降雨阈值存在较大差异。侵蚀性降雨阈值不仅受土壤自身特性如粒径分布和有机质含量的影响, 还与当地的气候状况如降雨雨型有关。

关键词: 侵蚀性降雨阈值; 降雨量; 最大 30 min 雨强; 中国水蚀区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)04-0227-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 王瀛, 杨扬, 刘宝元, 等. 中国水蚀区 5 种典型土壤的侵蚀性降雨阈值比较[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 227-233. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.029; Wang Ying, Yang Yang, Liu Baoyuan, et al. Erosive rainfall thresholds for five typical soils in water erosion region of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 227-233.

Erosive Rainfall Thresholds for Five Typical Soils in Water Erosion Region of China

Wang Ying^{1,2}, Yang Yang^{1,2}, Liu Baoyuan², Liu Yingna¹

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

Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The practical thresholds separating erosive from non-erosive rainfall events were determined to effectively reduce the workload of soil erosion prediction, and to provide references for regional soil erosion prevention. [Methods] Five bare fallow runoff plots packed with typical soils from five water erosion subregions of China were established in the Fangshan District of Beijing City. We used the rainfall erosivity deviation method to derive the two thresholds of rainfall amount (P) and maximum 30-minute rainfall intensity (I_{30}) for each plot based on runoff and soil loss data obtained during 2006—2019. [Results] ① The I_{30} thresholds were more effective than the P thresholds in identifying erosive rainfall events. ② The erosive rainfall thresholds were highest for the black and cinnamon soil plots, both having P thresholds of 10.0 mm and I_{30} thresholds of 10.2 mm/h, followed by the loess plot with P and I_{30} thresholds of 9.5 mm and 8.9 mm/h, respectively. The thresholds were lower for the purple and red soil plots. The corresponding

收稿日期: 2022-06-12

修回日期: 2022-07-14

资助项目: 国家重点研发计划项目“侵蚀退化农田生态生产功能重建机制和提升关键技术与示范”(2021YFD1500803); 地表过程与资源生态国家重点实验室重点项目“典型黑土区冻融循环特征及其对水力侵蚀的影响机制”(2021-ZD-05)

第一作者: 王瀛(1997—), 女(汉族), 辽宁省朝阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: y_wang@mail.bnu.edu.cn.

通讯作者: 杨扬(1987—), 女(汉族), 福建省将乐县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: yang.yang@bnu.edu.cn.

P thresholds were 5.4 and 6.1 mm, respectively, and the I_{30} thresholds were 3.2 and 5.2 mm/h, respectively. ③ To acquire reliable and stable thresholds, at least 12 years of runoff and soil loss monitoring data were required for each plot. [Conclusion] Erosive rainfall thresholds differed among soils in different regions due to differences in soil properties such as particle size distribution and organic matter content, as well as in local climate factors such as rainfall pattern.

Keywords: erosive rainfall threshold; rainfall amount; maximum 30-minute intensity; water erosion region of China

降雨是土壤侵蚀的主要动力之一,但并非所有降雨事件都可导致水土流失。只有当降雨特征满足一定的临界标准,才可引起侵蚀^[1-2],该临界值被称作侵蚀性降雨阈值^[3-4]。准确拟定侵蚀性降雨阈值,有效识别侵蚀性降雨事件,剔除未发生侵蚀的降雨,可大幅减少土壤侵蚀预报的工作量,对于指导区域土壤侵蚀防治具有重要意义^[4-5]。目前,侵蚀性降雨阈值主要通过 3 种方法获得。①频率分析法:通过绘制选定降雨特征的累积频率曲线,取某一累积频率如 80%^[3, 6-7]和 90%^[8]对应的特征值为侵蚀性降雨阈值。该方法中的频率参数由人为界定,主观性较大^[6]。②回归分析法:以选定降雨特征为自变量,径流深为因变量,建立二者的线性回归方程,取横坐标截距为侵蚀性降雨阈值。该方法易受降雨样本的影响,得出的侵蚀性降雨阈值往往代表性不足。例如,由于结皮的形成,Liu 等^[9]和 Feng 等^[10]在较小的雨量条件下也观察到了产流。基于回归分析法得到的侵蚀性雨量阈值仅分别为 4.3 和 0.2 mm。③降雨侵蚀力偏差法:将所有降雨事件的降雨侵蚀力按照选定降雨特征由大到小依次累加,当累积降雨侵蚀力接近侵蚀性降雨的降雨侵蚀力之和时,对应的特征值即为侵蚀性降雨阈值^[4]。观测资料的年份序列越长,样本量越多,得到的阈值往往越稳定^[11]。该方法可客观反映土壤侵蚀的降雨临界条件,目前应用较广^[12]。

中国是土壤侵蚀最严重的国家之一,水土流失区域差异明显。为提高水土流失调查和治理效率,水利部^[13]将水力侵蚀区划分为 5 个二级类型区。各区的地形、气候条件各异。不同研究者采用的侵蚀性降雨标准拟定方法也不尽相同,得到的侵蚀性降雨阈值往往无法直接比较^[5, 14-17],难以反映不同土壤对降雨的响应。因此,本研究通过采集 5 个水蚀二级区的典型土壤,布设并监测各土壤径流小区 2006—2019 年的产流产沙,利用广泛采用的降雨侵蚀力偏差法求取 5 种土壤的侵蚀性降雨雨量(P)及最大 30 min 雨强(I_{30})阈值,并计算拟定各土壤侵蚀性降雨阈值所需的最短资料年限,以期为区域土壤侵蚀预报及水土保持规划提供参考。

1 材料与方法

1.1 径流小区布设

径流小区布设在北京市房山区的北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室综合试验基地(39°45'N, 116°13'N)。当地属暖温带半湿润季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。多年平均气温 12.9 °C;多年平均降水量 540 mm^[18],主要集中在 6—9 月,占全年 90%以上。

2005 年,在中国 5 个水力侵蚀二级类型区^[13]采集典型耕层土壤(0—20 cm),运输至位于房山区的综合试验基地后分别装填至 5 个径流小区中,装填深度为 30 cm。从北向南,5 种土壤依次为采自黑龙江省嫩江市的黑土(东北黑土区)、北京市密云区的褐土(北方土石山区)、陕西省米脂县的黄土(西北黄土高原区)、四川省南充市的紫色土(西南土石山区)和福建省安溪县的红壤(南方红壤丘陵区)。各土壤的粒径分布与有机质含量详见表 1。5 个小区的规格和处理一致,坡度均为 5°,坡向均为南向;坡长 20 m,宽 2.1 m。各小区均为休闲处理,每年 4 月进行翻耕,并定期除草,使植被覆盖度维持在 5%以下。

1.2 数据来源

2006—2019 年,每次降雨产流后,利用各小区坡底的分流桶和集流桶进行径流、泥沙的测量、采集和分析^[18-19]。与此同时,利用安装在试验基地的虹吸式自记雨量计记录降雨过程,分析、计算每次降雨的降雨量(P , mm)、最大 30 min 雨强(I_{30} , mm/h)、降雨动能(E , MJ/hm²)和降雨侵蚀力 $[R, (MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)]$ 。其中, E 采用 Brown 和 Foster^[20]提出的经验方程进行分段计算:

$$E = \sum_{j=1}^n e_j P_j \quad (1)$$

$$e_j = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082 I_j)] \quad (2)$$

式中: n 为各降雨事件基于雨强变化划分的总段数; e_j 为第 j 段降雨的单位动能 $[MJ/(hm^2 \cdot mm)]$; P_j 为第 j 段降雨的降雨量(mm); I_j 为第 j 段降雨的平均雨强(mm/h)。降雨侵蚀力 R 则参照通用土壤流

失方程(universal soil loss equation, USLE)^[21]定义为 E 和 I_{30} 的乘积 EI_{30} 。

在分析降雨过程数据时,若降雨间隔时间小于 6 h,则视作 1 场降雨;若间隔时间超过 6 h,则间隔前

后分属 2 次降雨事件^[21]。自记雨量计安装于 2006 年 7 月,所以当年仅有 7 月之后的降雨记录。2006—2019 年雨量计记录了侵蚀性和非侵蚀性降雨事件共计 508 次。

表 1 各径流小区土壤粒径分布和有机质含量

| 土壤类型 | 采样地点 | 土壤质地 | 不同粒径土壤所占比例 | | | 有机质含量 % |
|------|---------|------|---------------|-------------------|---------------|------------|
| | | | 黏粒(<0.002 mm) | 粉粒(0.002~0.05 mm) | 砂粒(0.05~2 mm) | |
| 黑土 | 黑龙江省嫩江市 | 粉黏壤土 | 38.7 | 59.5 | 7.8 | 5.40 |
| 褐土 | 北京市密云区 | 粉壤土 | 18.2 | 57.8 | 24.0 | 1.16 |
| 黄土 | 陕西省米脂县 | 粉壤土 | 13.2 | 63.0 | 23.8 | 0.51 |
| 紫色土 | 四川省南充市 | 粉黏壤土 | 36.2 | 57.1 | 6.7 | 0.64 |
| 红壤 | 福建省安溪县 | 黏壤土 | 25.9 | 29.1 | 45.0 | 0.78 |

1.3 侵蚀性降雨阈值的计算与评估

本文选取常用的 P 和 I_{30} 作为侵蚀性降雨阈值指标。以降雨量 P 为例,对于任一径流小区,将 2006—2019 年观测到的所有侵蚀降雨事件的 R 值相加得到降雨侵蚀力之和 R_t ;然后将 R 按照降雨量从大到小进行累加,直到累计值 R_c 最接近 R_t 。参与累加的最后一场降雨的 P 值即为侵蚀性降雨的雨量阈值^[4]。在计算过程中,如果两场降雨对应的 R_c 与 R_t 的绝对差值相等,则选择较大的降雨量 P 值作为侵蚀性降雨 P 阈值。同理,将上述过程中的 P 替换为 I_{30} ,计算各小区的侵蚀性降雨 I_{30} 阈值。

各侵蚀性降雨阈值通过相对误差(relative error index, REI),正选率(correct selection index, CSI),错选率(wrong selection index, WSI)和剔除率(efficiency index, EFF)这 4 个指标进行评估^[4,22]。

(1) REI 基于降雨侵蚀力评估阈值精度:

$$REI = \frac{|R_c - R_t|}{R_t} \times 100\% \quad (3)$$

(2) CSI 和 WSI 则分别反映侵蚀性降雨阈值的有效性和偏差程度:

$$CSI = \frac{N_c}{N_t} \times 100\% \quad (4)$$

$$WSI = \frac{N_{exc} + N_{mis}}{N_t} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N_t 为观测到的侵蚀性降雨事件总数; N_c 为通过阈值正确选中的降雨事件数; N_{exc} , N_{mis} 分别为未发生侵蚀却被选中以及发生侵蚀却被剔除的降雨事件数。总体而言,REI 和 WSI 越低,CSI 越高,侵蚀性降雨阈值越准确。

(3) 计算侵蚀性降雨标准的主要目的在于筛选侵蚀性降雨,提高工作效率。应用侵蚀性降雨阈值节省的工作量可通过 EFF 加以衡量:

$$EFF = \frac{N_e}{N_t} \times 100\% \quad (6)$$

式中: N_e 为利用侵蚀性降雨阈值剔除的降雨事件数。

1.4 基于不同年限数据计算侵蚀性降雨阈值

若忽略 2006 年 7 月雨量计安装之前的侵蚀性降雨事件,本文中各径流小区的降雨和径流泥沙资料年限长达 14 a(2006—2019 年)。从最短的 1 a($n=1$ a) 开始,利用前文中的方法计算各小区基于 2006—2019 年历年降雨和径流泥沙数据的侵蚀性降雨标准,得到 $n=1$ a 的侵蚀性降雨阈值序列。随后利用 2006—2007 年,2007—2008 年等每 2 a 的监测资料计算 $n=2$ a 的各小区侵蚀性降雨阈值序列。依此类推,基于 $n=1, \dots, 14$ a 共 14 个不同年限的资料计算侵蚀性降雨阈值序列。各年限的侵蚀性降雨阈值利用相对误差(RE)、变异系数(coefficient of variation, C_v)与合格率(passing ratio, PR)进行评估。

(1) 与前文中基于降雨侵蚀力评估各侵蚀性降雨阈值的相对误差指标 REI 不同,RE 刻画不同年限降雨阈值与最长年限(14 a)阈值的差异^[11]:

$$RE = \frac{|T_i - T|}{T} \times 100\% \quad (7)$$

式中: T_i 为基于 i 年资料所得侵蚀性降雨阈值; T 为基于 14 a 资料得到的阈值。

(2) C_v 反映各年限侵蚀性降雨阈值序列的稳定性^[11]:

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: S 为某一年限侵蚀性降雨阈值序列的标准差; \bar{X} 为基于该年限资料得到的平均阈值。

(3) PR 为通过统计 RE 小于 10% 的侵蚀性降雨阈值样本数 n_q , 计算其占该年限侵蚀性降雨阈值序列样本总数 n_t 的比例^[16]:

$$PR = \frac{n_q}{n_i} \times 100\% \quad (9)$$

2 结果与分析

2.1 不同径流小区的侵蚀性降雨阈值

基于 5 个径流小区 2006—2019 年共 14 a 的降雨及径流泥沙监测资料,计算得到各小区的侵蚀性降雨 P 和 I_{30} 阈值(表 2)。无论装填何种土壤,小区各侵蚀性降雨阈值的相对误差 REI 均接近 0,说明这些阈值

的误差较小,精度较高^[4,22]。各小区的 P 和 I_{30} 阈值可正确筛选出 74.6%~93.3% 的侵蚀性降雨场次,误选和漏选场次所占比例之和不超过 12%,可节省 64.2%~92.7% 的工作量(表 2)。比较 P 和 I_{30} 阈值发现,前者的 WSI 均高于后者,CSI 和 EFF 均低于后者(表 2)。个别土壤(如黄土)除外,但这 2 个阈值参数的评估指标值也十分接近。该结果与 Xie 等^[4]、汪邦稳等^[17]、张文源等^[23] 的研究一致,说明 I_{30} 阈值较 P 阈值的效果更佳。

表 2 各径流小区侵蚀性降雨雨量(P)和最大 30 min 雨强(I_{30})阈值及其相对误差(REI)、正选率(CSI)、错选率(WSI)和剔除率(EFF)

| 土壤类型 | 指标类型 | 侵蚀性降雨阈值 | REI/% | CSI/% | WSI/% | EFF/% |
|------|--|---------|-------|-------|-------|-------|
| 黑土 | P/mm | 10.0 | 0.00 | 81.9 | 9.2 | 71.5 |
| | $I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ | 10.2 | 0.04 | 83.3 | 2.8 | 72.7 |
| 褐土 | P/mm | 10.0 | 0.06 | 74.6 | 11.7 | 64.2 |
| | $I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ | 10.2 | 0.02 | 75.4 | 2.8 | 64.8 |
| 黄土 | P/mm | 9.5 | 0.04 | 80.3 | 10.2 | 69.1 |
| | $I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ | 8.9 | 0.03 | 79.6 | 6.1 | 68.5 |
| 紫色土 | P/mm | 5.4 | 0.02 | 92.3 | 0.6 | 89.4 |
| | $I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ | 3.2 | 0.01 | 93.3 | 0.6 | 92.7 |
| 红壤 | P/mm | 6.1 | 0.00 | 90.6 | 2.0 | 87.9 |
| | $I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ | 5.2 | 0.00 | 90.0 | 0.0 | 90.5 |

比较各小区的侵蚀性降雨标准发现,黑土和褐土小区的 P 和 I_{30} 阈值均较高(表 2)。虽然这 2 个径流小区的侵蚀性与非侵蚀性降雨场次并不完全相同,但二者的 P 阈值均为 10.0 mm, I_{30} 阈值均为 10.2 mm/h。黄土小区次之, P 和 I_{30} 阈值分别为 9.5 mm 和 8.9 mm/h。紫色土和红壤小区的侵蚀性降雨标准明显较低,二者的 P 阈值分别为 5.4 和 6.1 mm, I_{30} 阈值仅分别为 3.2 和 5.2 mm/h。

各径流小区之间的侵蚀性降雨阈值差异可能主要与所填土壤的粒径分布与有机质含量有关^[22]。在降雨早期,雨滴打击可使团聚体发生分散。一方面,团聚体变小,易在降雨和径流的作用下发生移动;另一方面,分散的土壤颗粒可堵塞表面土壤孔隙,从而阻碍下渗,促进产流^[24-25]。有机质是土壤团聚体最重要的胶结剂之一^[26],有机质含量越高,土壤团聚体往往越稳定,越不容易因雨滴击溅而分散^[27]。在本文的 5 种土壤中,黑土的有机质含量最高,达 5.40%,其团聚体相比其他土壤最为稳定,因而最不容易遭受侵蚀破坏^[19],引起侵蚀的降雨阈值相应较高。相比之下,紫色土和红壤的有机质含量较低,团聚体较不稳定,易因雨滴击溅发生分散;并可能进一步形成土壤结皮,促进产流,因而侵蚀性降雨 P 和 I_{30} 阈值均较低。Ben-Hur 等^[28] 和 Mamedov 等^[24] 均指出,雨滴击

溅通过破坏团聚体促进产流产沙的作用还与土壤本身的黏粒含量有关。当黏粒含量小于 20% 时,团聚体分散产生的黏粒颗粒往往不足以对入渗、径流造成强烈影响。褐土和黄土因其粉粒和砂粒含量高,入渗快,不易产流,侵蚀性降雨阈值较高。相比之下,前者的有机质含量略高,团聚体整体较大、较稳定^[29-30],较不容易发生侵蚀,对应的侵蚀性降雨阈值较高。

侵蚀性降雨阈值受土地利用^[5]、水土保持措施等^[17] 众多因素影响,同一种土壤的侵蚀性降雨阈值也可能存在巨大差异。表 3 列举了不同学者在中国各水蚀二级区基于休闲小区监测资料推求得到的侵蚀性降雨 P 和 I_{30} 阈值。黑土小区的侵蚀性降雨 P 阈值与张宪奎等^[15] 在黑龙江省克山县当地求取的结果相差不大,但 I_{30} 阈值却明显高于后者。这主要是由两地的降雨雨型差异决定的^[31-32]。在夏季,除与北方土石山区类似的短历时暴雨外,东北黑土区也存在一些低强度、长历时的降雨,若这些降雨使土壤饱和后仍持续,便可引起土壤侵蚀^[15,33]。因此,在东北黑土区得到的黑土侵蚀性降雨 I_{30} 阈值较低。与此类似,由于黄土高原的降雨呈短历时、高强度特点^[34],尽管当地得到的侵蚀性降雨 P 阈值相比本文有高有低、因地而异,但其 I_{30} 阈值均高于本文结果(表 2—3)^[5,31]。

表 3 中国不同水蚀二级区休闲小区的侵蚀性降雨雨量(P)和最大 30 min 雨强(I_{30})阈值

| 土壤类型 | 水蚀二级区 | 试验地点 | 侵蚀性降雨标准 | | 文献来源 |
|------|---------|---------|---------|----------------------------|-------------------------|
| | | | P/mm | $I_{30}/(mm \cdot h^{-1})$ | |
| 黑土 | 东北黑土区 | 黑龙江省克山县 | 9.8 | 7.6 | 张宪奎等 ^[15] |
| 褐土 | 北方土石山区 | 北京市密云区 | 18.9 | 17.8 | 刘和平等 ^[16] |
| 褐土 | 北方土石山区 | 河北省蔚县 | 16.0 | — | 赵光耀 ^[30] |
| 黄土 | 西北黄土高原区 | 甘肃省庆阳市 | 8.7 | 12.3 | 夏露等 ^[5] |
| 黄土 | 西北黄土高原区 | 陕西省绥德县 | 14.2 | 14.4 | Liang 等 ^[31] |
| 紫色土 | 西南土石山区 | 四川省资阳市 | 8.9 | 10.7 | 张奇 ^[14] |
| 红壤 | 南方红壤丘陵区 | 江西省德安县 | 11.2 | — | 马良等 ^[7] |
| 红壤 | 南方红壤丘陵区 | 江西省德安县 | 11.4 | 10.0 | 汪邦稳等 ^[17] |

相比北方地区,中国南方地区总体呈次降雨雨量大、历时长、雨强小的特点^[35]。因此,基于西南土石山区和南方红壤丘陵区休闲小区资料得到的紫色土和红壤 P 阈值(表 3)均高于本文结果(表 2)^[7,14,17]。在红壤丘陵区,每年 4—9 月是发生土壤侵蚀的主要时期。该时期土壤含水量较高,小雨强降雨也可引发土壤侵蚀^[32,36]。与此类似,西南土石山区的产流方式主要以蓄满产流为主,所以小雨强、长历时降雨同样也可引起紫色土侵蚀^[8]。然而,在这两个水蚀二级区得到的 I_{30} 阈值却大大高于本文结果(表 2—3)^[14,17]。可见,雨型并非决定侵蚀性降雨阈值的唯一要素。综合试验基地径流小区的红壤质地较粗、砂粒含量较高、团聚体稳定性较差,可能在较小的雨量和雨强条件下便可出现侵蚀产沙。与北方土石山区的对比结果同样也证实了这一点。在该区,刘和平等^[16]的径流小区中分布的是粗骨褐土,砂粒含量高达 63.7%;赵光耀^[30]的径流小区中分布石灰性褐土,碳酸钙含量较高,团聚体较稳定,因而对应的侵蚀性降雨阈值均较大^[37-39]。

2.2 不同径流小区拟定侵蚀性降雨标准所需最短年限

数据资料越长,得到的侵蚀性降雨阈值往往越稳定^[16-17]。随着数据年限的增长,各径流小区 P 和 I_{30} 阈值的平均相对误差(\overline{RE})和变异系数(C_v)均整体呈降低趋势(表 4—5)。采用合格率(PR)统计 RE 小于 10% 的阈值占比,该标准由人为界定,因而对于部分径流小区,PR 随数据年限的变化趋势并不明显。以 PR 达 100% 为标准,拟定黑土、褐土和黄土小区侵蚀性降雨 P 阈值至少需要 12 a 的数据资料,对应的 \overline{RE} 和 C_v 分别介于 1.7%~4.3% 和 0.6%~2.9% 之间(表 4)。相比之下,确定紫色土和红壤小区的 P 阈值仅需 8 a 监测数据。前者的 \overline{RE} 和 C_v 均为 0%,后者分别为 2.6% 和 4.1%。出现该结果的可能原因是紫色土和红壤较易发生侵蚀, P 阈值较小(表 2),出现侵蚀产沙的降雨次数较多,因此在较短的年限便可累积足够的侵蚀性降雨样本^[11]。对于侵蚀性降雨 I_{30} 阈值,各径流小区所需最短年限均为 12 a,对应的 \overline{RE} 和 C_v 分别介于 0%~3.1% 和 0%~5.6% 之间(表 5)。

表 4 基于不同年限资料所得各径流小区侵蚀性降雨雨量(P)阈值的平均相对误差(\overline{RE})、合格率(PR)和变异系数(C_v)

| 观测年限/a | 样本数 | 黑土 | | | 褐土 | | | 黄土 | | | 紫色土 | | | 红壤 | | |
|--------|-----|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|
| | | $\overline{RE}/\%$ | PR/ $\%$ | $C_v/\%$ |
| 1 | 14 | 73.9 | 21.4 | 84.4 | 95.2 | 21.4 | 93.4 | 80.2 | 28.6 | 81.3 | 133.3 | 14.3 | 98.5 | 114.7 | 28.6 | 94.4 |
| 2 | 13 | 48.8 | 15.4 | 69.2 | 59.2 | 15.4 | 63.5 | 49.6 | 30.8 | 58.9 | 50.7 | 15.4 | 70.7 | 44.0 | 38.5 | 66.4 |
| 3 | 12 | 66.8 | 8.3 | 70.5 | 50.3 | 8.3 | 58.7 | 26.8 | 58.3 | 50.9 | 12.8 | 33.3 | 11.6 | 15.2 | 41.7 | 23.3 |
| 4 | 11 | 69.0 | 27.3 | 73.7 | 42.8 | 0.0 | 45.0 | 17.3 | 54.5 | 26.1 | 10.4 | 45.5 | 12.1 | 22.4 | 36.4 | 40.8 |
| 5 | 10 | 44.2 | 20.0 | 58.5 | 36.6 | 0.0 | 36.9 | 12.8 | 50.0 | 16.2 | 6.9 | 60.0 | 10.5 | 10.2 | 30.0 | 12.0 |
| 6 | 9 | 28.4 | 11.1 | 33.7 | 28.1 | 0.0 | 28.1 | 8.8 | 55.6 | 9.2 | 10.3 | 55.6 | 13.5 | 9.7 | 33.3 | 11.6 |
| 7 | 8 | 24.1 | 12.5 | 28.2 | 27.1 | 0.0 | 22.6 | 9.8 | 62.5 | 17.1 | 4.2 | 62.5 | 5.5 | 3.7 | 87.5 | 9.6 |
| 8 | 7 | 16.4 | 28.6 | 21.6 | 13.9 | 28.6 | 7.8 | 7.1 | 57.1 | 7.2 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 2.6 | 100.0 | 4.1 |
| 9 | 6 | 7.7 | 66.7 | 9.1 | 14.0 | 50.0 | 9.0 | 7.4 | 50.0 | 8.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 1.6 | 100.0 | 5.2 |
| 10 | 5 | 13.8 | 20.0 | 8.8 | 11.0 | 60.0 | 9.2 | 5.9 | 60.0 | 7.3 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.3 | 100.0 | 5.7 |
| 11 | 4 | 13.3 | 25.0 | 10.0 | 6.3 | 75.0 | 4.3 | 6.9 | 50.0 | 8.3 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 6.3 |
| 12 | 3 | 1.7 | 100.0 | 0.6 | 4.3 | 100.0 | 2.9 | 2.1 | 100.0 | 1.8 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 7.2 |
| 13 | 2 | 1.0 | 100.0 | 0.0 | 2.0 | 100.0 | 0.0 | 2.2 | 100.0 | 1.5 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 8.6 |
| 14 | 1 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 |

表 5 基于不同年限资料所得各径流小区侵蚀性降雨最大 30 min 雨强 (I_{30}) 阈值的平均相对误差 (RE)、合格率 (PR) 和变异系数 (C_v)

| 观测年限/a | 样本数 | 黑土 | | | 褐土 | | | 黄土 | | | 紫色土 | | | 红壤 | | |
|--------|-----|-------|-------|----------|------|-------|----------|------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|
| | | RE/% | PR/% | C_v /% | RE/% | PR/% | C_v /% | RE/% | PR/% | C_v /% | RE/% | PR/% | C_v /% | RE/% | PR/% | C_v /% |
| 1 | 14 | 101.5 | 28.6 | 115.2 | 88.8 | 14.3 | 123.7 | 89.5 | 14.3 | 121.4 | 209.2 | 21.4 | 152.9 | 127.6 | 7.1 | 150.6 |
| 2 | 13 | 100.3 | 7.7 | 110.3 | 47.4 | 7.7 | 64.9 | 54.6 | 23.1 | 65.6 | 52.5 | 15.4 | 42.5 | 48.3 | 7.7 | 62.2 |
| 3 | 12 | 117.3 | 0.0 | 92.2 | 41.8 | 8.3 | 56.7 | 42.5 | 33.3 | 58.3 | 20.7 | 50.0 | 25.4 | 48.0 | 8.3 | 65.6 |
| 4 | 11 | 65.2 | 18.2 | 76.9 | 35.3 | 9.1 | 44.7 | 34.3 | 18.2 | 47.0 | 23.3 | 45.5 | 26.7 | 36.4 | 18.2 | 33.5 |
| 5 | 10 | 30.7 | 30.0 | 42.7 | 32.4 | 0.0 | 35.8 | 28.1 | 30.0 | 36.3 | 22.1 | 40.0 | 28.3 | 38.1 | 0.0 | 34.0 |
| 6 | 9 | 19.9 | 33.3 | 26.9 | 27.9 | 11.1 | 29.1 | 24.0 | 22.2 | 32.3 | 8.4 | 55.6 | 10.8 | 38.0 | 0.0 | 34.8 |
| 7 | 8 | 21.2 | 25.0 | 22.7 | 25.7 | 25.0 | 24.1 | 21.9 | 25.0 | 27.0 | 11.8 | 37.5 | 11.0 | 36.6 | 12.5 | 25.6 |
| 8 | 7 | 13.9 | 42.9 | 16.5 | 14.6 | 57.1 | 11.6 | 25.9 | 14.3 | 35.4 | 10.7 | 42.9 | 11.2 | 35.6 | 14.3 | 22.0 |
| 9 | 6 | 14.4 | 50.0 | 16.1 | 9.6 | 66.7 | 10.4 | 20.7 | 0.0 | 24.0 | 9.4 | 50.0 | 11.3 | 35.8 | 16.7 | 24.1 |
| 10 | 5 | 14.1 | 60.0 | 17.9 | 8.2 | 60.0 | 10.4 | 15.0 | 20.0 | 18.2 | 7.5 | 60.0 | 11.1 | 39.7 | 0.0 | 12.7 |
| 11 | 4 | 11.3 | 75.0 | 20.8 | 9.8 | 50.0 | 10.3 | 7.7 | 50.0 | 10.4 | 4.7 | 75.0 | 9.8 | 32.7 | 0.0 | 9.9 |
| 12 | 3 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 2.9 | 100.0 | 4.8 | 3.1 | 100.0 | 5.6 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.8 | 100.0 | 1.5 |
| 13 | 2 | 0.5 | 100.0 | 0.6 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.9 | 100.0 | 1.2 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 1.3 | 100.0 | 1.8 |
| 14 | 1 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 |

对于 5 个径流小区,若要获得稳定、可靠的侵蚀性降雨阈值,都至少需要 12 a 的监测资料,普遍高于以往研究者的结果^[11,16-17,30,40]。这可能主要由两方面原因造成。一是各地区的年内降雨频率不尽相同。例如,赣北红壤区降雨频繁,9 a 的降雨事件高达 1 359 次,远高于本文试验所在地,因而仅需 3 a 即可满足拟定休闲小区侵蚀性降雨 P 阈值的降雨场次^[17]。二是近年来华北地区的降雨年际变化增大,且由于降雨历时增长、 I_{30} 增大,夏季极端降雨出现的频率增加^[41]。在这种情况下,需要更长年限的降雨观测资料才可使侵蚀性降雨阈值达到稳定。刘和平等^[16]与赵光耀^[30]同在北方土石山区针对褐土休闲小区开展研究,但前者所用资料年限为 1993—1999 年及 2001—2003 年,后者为 2005—2015 年,得到的最短年限分别为 7 和 10 a。二者与本文的 12 a 结果一起,构成了随观测资料时间推移大致递增的最短年限序列。

3 结论

(1) 相比侵蚀性降雨 P 阈值,最大 30 min 雨强 I_{30} 阈值在区分侵蚀性降雨和非侵蚀性降雨方面较为有效。后者的 WSI 总体较低,CSI 和 EFF 较高。

(2) 黑土和褐土径流小区的侵蚀性降雨阈值较高,二者的 P 阈值均为 10.0 mm, I_{30} 阈值均为 10.2 mm/h;紫色土与红壤小区较低,二者的 P 阈值分别为 5.4 和 6.1 mm, I_{30} 阈值分别为 3.2 和 5.2 mm/h;黄土小区居中, P 和 I_{30} 阈值分别为 9.5 mm 和 8.9 mm/h。该结果主要与各土壤的粒径分布及有机质含量有关。

(3) 与中国各水蚀二级区的侵蚀性降雨标准结果相比,本文得到的各土壤侵蚀性降雨 P 和 I_{30} 阈值不尽相同。这主要源自各地的降雨雨型及土壤性质

差异。此外,由于不同地区气候各异,土壤水分状况可能存在较大差别,从而影响侵蚀性降雨阈值的大小。在今后的研究中,有必要将前期土壤含水量纳入考虑,系统、深入地探讨造成各类型土壤侵蚀性降雨阈值差异的原因。

(4) 各水蚀二级区径流小区都需 12 a 监测资料才可满足拟定侵蚀性降雨阈值的要求,普遍高于以往研究结果,这主要与不同研究区的降雨频率差异及近年来华北地区的降雨年际变化加剧有关。

[参 考 文 献]

- [1] Todisco F. The internal structure of erosive and non-erosive storm events for interpretation of erosive processes and rainfall simulation [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 3651-3663.
- [2] Fang Nufang, Wang Ling, Shi Zhihua. Runoff and soil erosion of field plots in a subtropical mountainous region of China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 387-395.
- [3] 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.
- [4] Xie Yun, Liu Yuanbao, Nearing M A. Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(6): 1843-1847.
- [5] 夏露, 宋孝玉, 符娜, 等. 陇东黄土塬区不同下垫面条件下侵蚀产沙的降雨阈值[J]. 水科学进展, 2018, 29(6): 828-838.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Liu Yu, Fu Bojie, Lü Yihe, et al. Hydrological respon-

- ses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2012, 138(1):404-414.
- [10] Feng Qiang, Zhao Wenwu, Wang Jun, et al. Effects of different land-use types on soil erosion under natural rainfall in the Loess Plateau, China [J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2):243-256.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 中华人民共和国水利部. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [14] 张奇. 遂宁组母质侵蚀规律的初步研究[J]. *水土保持通报*, 1992, 12(3):34-39.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 汪邦稳, 方少文, 宋月君, 等. 赣北第四纪红壤区侵蚀性降雨强度与雨量标准的确定[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(11):100-106.
- [18] Wang Wenting, Yin Shuiqing, Xie Yun, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall [J]. *Catena*, 2016, 141:56-65.
- [19] Hao Yanfang, Yang Yang, Liu Baoyuan, et al. Size characteristics of sediments eroded from three soils in China under natural rainfall [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(8):2153-2165.
- [20] Brown L C, Foster G R. Storm erosivity using idealized intensity distributions [J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(2):379-386.
- [21] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. *Agriculture Handbook*, No.537. 1978.
- [22] Todisco F, Vergni L, Vinci A, et al. Practical thresholds to distinguish erosive and rill rainfall events [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579:124173.
- [23] 张文源, 王百田, 杨光熹, 等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11):1776-1782.
- [24] Mamedov A I, Levy G J, Shainberg I, et al. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff [J]. *Soil Research*, 2001, 39(6):1293-1305.
- [25] Wakindiki I I C, Ben-Hur M. Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3):897-905.
- [26] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2):141-163.
- [27] Causarano H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates [J]. *Soil and Tillage Research*, 1993, 28(1):15-25.
- [28] Ben-Hur M, Shainberg I, Bakker D, et al. Effect of soil texture and CaCO₃ content on water infiltration in crusted soil as related to water salinity [J]. *Irrigation Science*, 1985, 6(4):281-294.
- [29] 郝燕芳, 刘宝元, 杨扬, 等. 中国5种典型土壤的侵蚀泥沙粒径分布特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2):150-159.
- [30] 赵光耀. 唐秦地区侵蚀性降雨及降雨侵蚀力时空变化研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2019.
- [31] Liang Yue, Jiao Juying, Dang Weiqin, et al. The thresholds of sediment-generating rainfall from hillslope to watershed scales in the Loess Plateau, China [J]. *Water*, 2019, 11(11):2392.
- [32] 涂安国, 谢颂华, 李英, 等. 长期野外监测红壤裸露坡地侵蚀性降雨分布及产沙分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7):129-135.
- [33] 郑粉莉, 边锋, 卢嘉, 等. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2):90-97.
- [34] 焦菊英, 王万忠, 郝小品. 黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J]. *干旱区资源与环境*, 1999, 13(1):34-42.
- [35] 谢云, 林小鹏, 殷水清, 等. 中国次雨量特征及其区域分异[J]. *地理学报*, 2009, 64(3):323-330.
- [36] 张向炎, 史学正, 于东升, 等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1):23-29.
- [37] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators [J]. *Catena*, 2001, 44(1):47-67.
- [38] 王春明, 包维楷, 陈建中, 等. 岷江上游干旱河谷区褐土不同亚类剖面及养分特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3):230-234.
- [39] Yang Yang, Ye Zhihan, Liu Baoyuan, et al. Nitrogen enrichment in runoff sediments as affected by soil texture in Beijing Mountain area [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(2):971-978.
- [40] 包昂, 范昊明, 许秀泉, 等. 东北半干旱区不同耕作方式下的侵蚀性降雨标准比较[J]. *土壤通报*, 2022, 53(1):81-88.
- [41] 战云健, 鞠晓慧, 范邵华, 等. 1965—2019年中国夏季分钟降水空间分布与长期趋势分析[J]. *气象学报*, 2021, 79(4):598-611.