延河流域降雨侵蚀力时空分布特征

刘春利[1,3], 杨勤科[2*], 谢红霞[4]

(1. 山东大学威海分校, 威海 264209; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 4. 湖南农业大学资源与环境学院, 长沙 410128)

摘要: 降雨侵蚀力(R)反映了降水引起土壤水蚀的潜在能力, 其时空分布规律定量研究是进行土壤侵蚀预报的基础. 利用延河流域 22 个雨量站 24a 逐日降雨资料, 分析了该区降雨侵蚀力的时空分布特征. 结果表明, 降雨侵蚀力与降雨量、侵蚀性降雨量具有一致的年内年际变化趋势. 降雨侵蚀力年内变化为单峰型, 集中分布在 5 ~ 9 月, 占全年 R 值的 91.61%. 降雨侵蚀力多年平均值为 1 580.58 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, 最高值(1981 年)为 2 417.70 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, 最低值(1999 年)仅 585.29 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, 年际间变化为中等变异, 变异系数为 0.32. 烧房砭站多年平均 R 值最大, 为 2 190.33 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, 镰刀湾和杨山站多年平均 R 值最小, 分别为 1 151.37 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$ 和 1 146.87 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$. R 值与侵蚀性降雨量具有一致的空间分布格局, 北部雨量站 R 值年际变化呈现轻微的增加趋势, 其它站点 R 值年际变化相对呈现出轻微的减少趋势, 总体上延河流域降雨侵蚀力呈现下降趋势, 趋势系数为 −0.004.

关键词: 降雨侵蚀力; 通用土壤流失方程(USLE); 趋势系数; 时空分布; 延河流域

中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2010)04-0850-08

Spatial and Temporal Distributions of Rainfall Erosivity in the Yanhe River Basin

LIU Chun-li[1,3], YANG Qin-ke[2], XIE Hong-xia[4]

(1. Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China; 4. College of Resources and Environment Sciences, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Rainfall erosivity (R) is a measure of effects of the rainfall factor on the potential capacity for soil water erosion. The characteristic of spatial and temporal of R value is the basis for soil erosion prediction. The spatial and temporal distributions of rainfall erosivity were analyzed using daily rainfall data collected between 1980 and 2003 from 22 rainfall stations located across the Yanhe River Basin. The results showed that the seasonal distribution of R values formed a single peak, concentrated between May and September and accounted for 91.61% of the total annual R value. The changes in annual average rainfall erosivity followed a similar trend to those for the annual average rainfall and erosive rainfall. The average annual R value was 1 580.58 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, the maximum annual rainfall erosivity (1981) was 2 417.70 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$ and the minimum (1999) was 585.29 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$. The variation coefficient of annual rainfall erosivity was the medium with a value of 0.32. The annual rainfall erosivity was the greatest at the Shaofangbian station with a value of 2 190.33 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, while the least erosivity was found at the Liandaowan and Yangshan station with values of 1 151.37 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$ and 1 146.87 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, respectively. The annual average R values had a similar trend of spatial distribution with annual average erosive rainfall. The annual changes in R values increased at the rainfall stations of north, while those were found to decrease at other stations of Yanhe River Basin. Overall, the annual rainfall erosivity tended to decrease in the Yanhe River Basin with the trend coefficient value of −0.004.

Key words: rainfall erosivity; universal soil loss equation (USLE); trend coefficient; spatial and temporal distributions; Yanhe River Basin

土壤侵蚀和水土流失是黄土丘陵沟壑区目前面临的最严峻的生态环境问题[1,2]. 降雨是引起土壤侵蚀的主要动力因素[3], 降雨侵蚀力指由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力. 降雨侵蚀力年内分配对土壤侵蚀有重大影响, 它是通用土壤流失方程(USLE)和修订通用土壤流失方程(RUSLE)中计算作物覆盖与管理 C 因子的重要参考因素[4,5], 同时降雨侵蚀力的时间和空间分布特征, 对于土壤流失的预报、小流域水土保持综合治理等都具有重要指导意义. 已

收稿日期: 2009-07-01; 修订日期: 2009-08-19
基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB407203); 中国科学院水利部西北水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室基金项目(10501-203)
作者简介: 刘春利(1980 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤环境生态, E-mail: chunliliu@sdu.edu.cn
* 通讯联系人, E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn

有研究对降雨侵蚀力时间变化和空间分布做了大量的分析[6~9],王万忠等[10,11]曾以全国 29 个站点资料为基础简要分析了我国降雨侵蚀力的年内分配规律,并利用 125 个站点多年平均降雨特征参数分析估算了全国降雨侵蚀力空间分布;吴志峰等[12]分析了广东省 1961~2001 年间大部分地区降雨侵蚀力 R 值的年际变化特征;史东梅等[13]利用涪陵区 49 a 气象资料,对该地区降雨侵蚀力年内年际变化特征进行研究,表明 R 值年际差异非常显著;章文波等[14]分析了全国降雨侵蚀力空间变化特征,结果显示全国降雨侵蚀力的空间分布具有明显的区域性,其与降雨量空间分布趋势近似.

延河流域位于我国侵蚀最为严重的黄土高原中部,跨 3 个生物气候带(森林、森林草原和典型草原),是黄土高原土壤侵蚀最为严重和典型的大流域,也是黄土高原土壤侵蚀治理的主要流域,而目前对于与土壤侵蚀预报模型紧密相关的降雨侵蚀力因子的相关研究甚少. 本研究基于日雨量资料,对该地区降雨和降雨侵蚀力的年际变化和季节分布特征进行了较为系统地分析,对 R 值年际变化趋势进行了研究,以期为该流域土壤侵蚀综合治理及其防治提供理论依据.

1　研究区域与方法

1.1　研究区域概况

延河流域位于黄土高原中部,面积7 687 km^2,其中 90% 的面积属于黄土高原丘陵沟壑区,地形复杂,海拔 495~1 795 m,坡度 0~60°. 该区属于半干旱大陆性气候,年均气温 9℃,年均降雨量 520 mm,多集中在 6~8 月,其降水量占全年 68.55%,且多暴雨,其径流量占全年 99.95% ~100%,冲刷量占全年 94% ~100%. 土壤类型有黄绵土、冲积土、黏土、黑垆土等,分布最广的是黄绵土. 植被类型从南向北分为南部崂山辽东栎、刺槐、油松、阔叶-针叶混交林带,中部延安到安塞之间为柠条、白羊灌草草原过渡带,安塞以北为百里香、长芒草草原带. 因此,延河流域由于丘陵沟壑区,沟壑纵横,坡地面积广大,及多暴雨等自然条件和人为活动的原因,使得该地区土壤侵蚀十分严重.

1.2　研究方法

1.2.1　降雨侵蚀力计算

降雨侵蚀力 R 的计算可分为 $E\times I_{30}$的经典计算方法和常规气象资料的简易计算模型两类. 在实际应用中,由于降雨动能 E 和 30 min 降雨强度 I_{30}资料获取难度较大,所以国外许多学者根据区域性降雨侵蚀特点,建立了基于降雨量的 R 值简易计算模型[10,11,15~17],即利用雨量站常规降雨统计资料如日雨量、月雨量、年雨量或其它雨量参数来估算降雨侵蚀力[18,19],并在实践中获得好的应用. 目前,基于日雨量资料计算和评价降雨侵蚀力的模型应用最为广泛[20,21]. 本研究以 1980~2003 年延河流域 22 个基本雨量站日降雨资料为基础(各站点的基本情况见表 1),采用章文波等[22]使用的全国日降雨数据拟合的模型估算降雨侵蚀力,并分析其时空变化特征. 模型如下:

$$R_{半月} = \alpha\sum_{k=1}^{m}(P_k)^{\beta} \tag{1}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \tag{2}$$

$$\beta = 0.8363 + 18.144/P_{d12} + 24.455/P_{y12} \tag{3}$$

式中,$k=1,2,3,\cdots,m$,是某半月内侵蚀性降雨日数,P_k 是半月内第 k d 的日雨量,本研究侵蚀性降雨量使用的标准是 12 mm[23],否则以 0 计算. $R_{半月}$表示第 i 个半月时段的降雨侵蚀力 R 值. α 和 β 是模型参数,P_{d12}表示日雨量≥12 mm 的日平均雨量(即 1 a 中≥12 mm 日雨量的总和与相应日数的比值),P_{y12}表示日雨量≥12 mm 的年平均雨量(即 1 a 中≥12 mm 日雨量年累加值的多年平均). 利用式(1)~(3)计算逐年各半月的降雨侵蚀力,经汇总可得到月降雨侵蚀力、年降雨侵蚀力和多年平均降雨侵蚀力. 降雨侵蚀力单位为[MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$].

1.2.2　趋势系数

趋势系数用来判断降雨等气候因子在长期变化过程中的上升或下降趋势[24~26]. 降雨侵蚀力是降雨特性的函数,通常与降雨具有一致的变化趋势,因此也可通过趋势系数来反映降雨侵蚀力长期趋势变化的方向和程度,它为 n 个时刻的降雨侵蚀力与自然数列 1,2,3,4,…,n 的相关系数:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(i-\bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(i-\bar{t})^2}} \tag{4}$$

式中,x_i 是第 i 年的降雨侵蚀力,$\bar{x}$ 为样本均值,$\bar{t}$ 为自然数序列的均值,n 为降雨侵蚀力序列的长度,即年份序号,r_{xt}为趋势系数,若 r_{xt}值为正时,表示降雨侵蚀力在所计算的时段内呈现增加趋势;若 r_{xt}为负时,表示其呈现减少趋势.

表 1 1980 ~ 2003 年延河流域雨量站多年平均降雨量资料/mm

Table 1 Data of annual average rainfall data for rainfall stations in Yanhe River Basin during 1980 ~ 2003/mm

站点	经纬度	年均降雨量	最大值	最小值
白家川	110.08°E, 36.55°N	496.80	867.30	301.10
张川河	109.77°E, 36.63°N	493.22	814.20	274.20
黑家堡	109.88°E, 36.65°N	489.85	761.20	247.40
吊沟村	109.78°E, 36.83°N	486.61	820.10	266.50
斗咀	110.27°E, 36.45°N	495.58	830.10	212.90
甘谷铎	109.80°E, 36.70°N	498.35	691.30	259.90
青化砭	109.65°E, 36.78°N	464.65	651.20	129.10
寺沟	109.42°E, 36.95°N	500.54	697.00	225.60
庙岸	109.60°E, 36.55°N	524.77	717.10	249.50
龙寺	109.38°E, 36.47°N	526.14	759.60	334.16
烧房砭	109.15°E, 36.55°N	591.42	819.30	336.00
金盆湾	108.97°E, 36.67°N	527.70	717.80	256.40
沿河湾	109.37°E, 36.77°N	503.55	765.60	287.10
康岔	109.07°E, 36.80°N	446.79	674.30	152.00
王窑	109.10°E, 36.88°N	488.85	685.10	269.00
杏河	108.87°E, 36.93°N	454.48	718.30	219.60
张渠	108.83°E, 37.05°N	486.01	675.80	313.40
大路沟	108.77°E, 37.18°N	471.02	727.70	286.30
谭家营	109.22°E, 37.00°N	494.40	613.90	265.00
化子坪	109.08°E, 37.08°N	423.84	678.00	217.20
镰刀湾	108.98°E, 37.20°N	402.62	566.30	113.40
杨山	108.93°E, 37.20°N	356.24	623.40	86.50

2 结果与分析

2.1 降雨和侵蚀性降雨的年内分布特征

降雨年内分布对水土流失影响很大. 对延河流域 24 a 逐日降雨资料进行了筛选,将 ≥12 mm 的日降雨量列入侵蚀力计算,将 <12 mm 的日降雨资料剔除掉. 虽研究时段内早春和晚冬时节降雨多以溶雪形式出现,但因 ≥12 mm 的溶雪占侵蚀性降雨量的百分比非常小,所以降雨侵蚀力的计算仍采用公式(1) ~ (3). 该地区降雨量和侵蚀性降雨量及其各自降雨日数的年内分布见图 1. 从降雨量来看,延河流域多年平均降雨量年内分布呈现单峰型,主要集中在 6 ~ 9 月,该时段雨量可达 345.78 mm,占年降雨量 71.6%. 侵蚀性降雨量同样也集中在 5 ~ 9 月,可占年总侵蚀性降雨的 85.67%,而在 5 ~ 9 月中,侵蚀性降雨量在当月降雨量中所占的比例也都超过了 50%,最大为 74.07%,最小为 53.09%. 从降雨日数分布情况看,年内降雨日数仍然呈现出单峰式型,最大日数出现在 8 月,最小日数出现在 12 月,6 ~ 9 月降雨日数可占年降雨日数的 55.67%. 侵蚀性降雨日数也集中出现在 5 ~ 9 月,占年总侵蚀性降雨日数的 87.83%.

对侵蚀性降雨量、降雨日数与总降雨量、降雨日

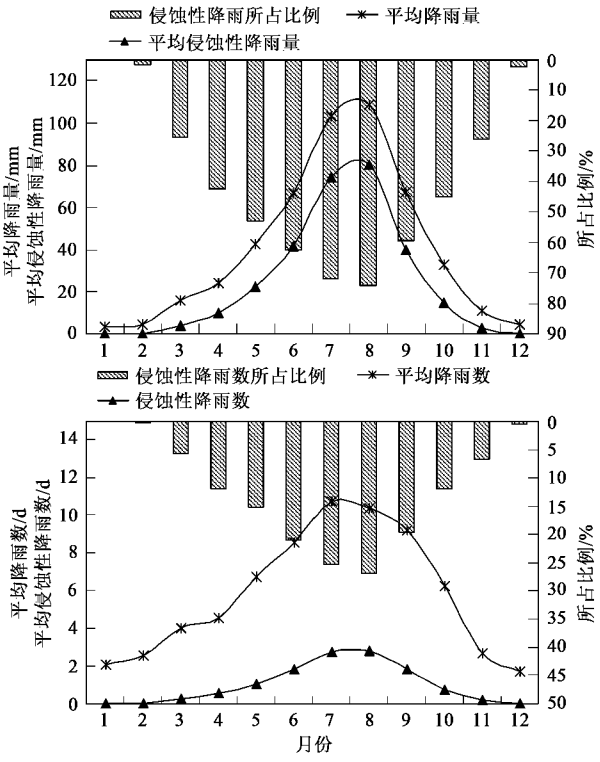

图 1 1980 ~ 2003 年延河流域多年平均侵蚀性降雨量和降雨日数的季节分布

Fig. 1 Seasonal distribution of average annual erosive rainfall amount and time in Yanhe River Basin during 1980-2003

数比较可知,年侵蚀性降雨日数仅占年总降雨日数的 16.96%,而侵蚀性降雨量却占年总降雨量 60.15%.这说明 1a 中在该地区土壤侵蚀主要是由那些发生次数少、降雨量和降雨强度较大的降雨所产生的.

利用 Kriging 空间内插生成的各雨量站年平均侵蚀性降雨量、年平均侵蚀性降雨日数占年平均降雨量日数百分比的等值线图(图 2)表明,24a 间延河流域北部的杨山和镰刀湾站年平均侵蚀性降雨量较少,年平均侵蚀性降雨量等值线约为 260 ~ 270 mm,而位于西南部的金盆湾、烧房砭和龙寺站多年平均侵蚀性降雨量较大,多年平均侵蚀性降雨量等值线约为 300 ~ 340 mm,其它站点侵蚀性降雨量则介于这二者之间.多年平均侵蚀性降雨日数占降雨量日数的百分比空间变化趋势与年平均侵蚀性降雨量空间分布格局稍有不同,流域南部金盆湾、烧房砭

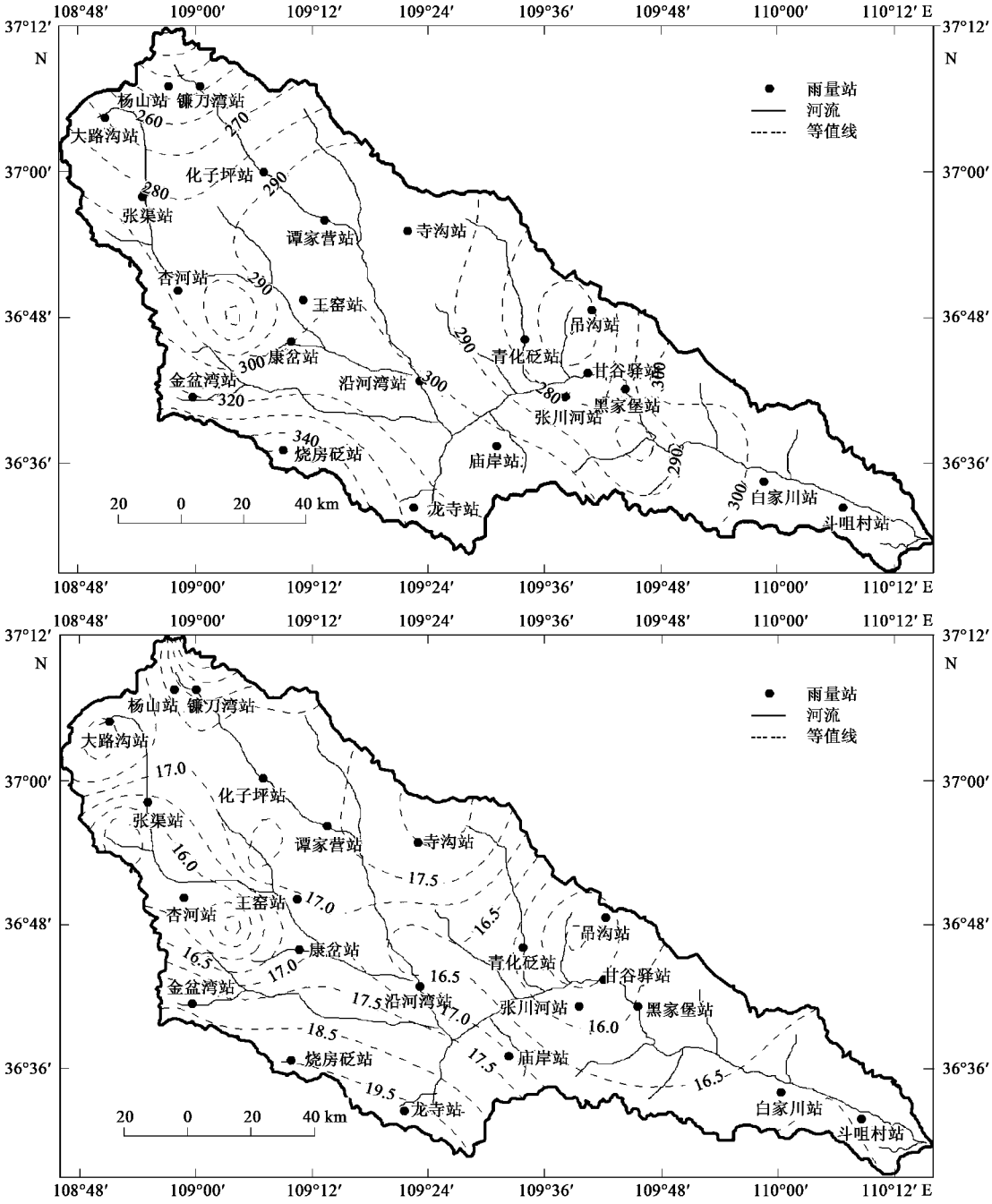

图 2　延河流域 1980 ~ 2003 年平均降雨量和侵蚀性降雨量等值线图

Fig. 2　Isogram distribution of average annual rainfall and erosive rainfall in Yanhe River Basin during 1980-2003

和龙寺站多年平均侵蚀性降雨日数比值较大,其它雨量站平均降雨侵蚀力日数占降雨量比值较小.

2.2 降雨侵蚀力年内年际分布特征

分别计算各月多年平均降雨侵蚀力 R 值占年降雨侵蚀力 R 值的比率,并以此绘制该地区多年平均降雨侵蚀力 R 值的年内分配曲线(图 3). 图 3 表明 R 年内分布特征表现为单峰型,降雨侵蚀力 R 集中分布在 5 ~ 9 月,可占年 R 值的 91.61%,这与降雨量和侵蚀性降雨量年内分布总体趋势是一致的;降雨侵蚀力最大值出现在 8 月,R 值为 480.48 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$,占年 R 值的 30.31%,1 月 R 值为 0, 2 月为 0.07 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, 12 月为 0.08 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$,这 3 个月 R 值总和占年 R 值的 0.57%,不足 1%. 由此可见晚冬和早春时节降雨侵蚀力很低,即使是以溶雪形式产生,对年降雨侵蚀力的结果并没有影响,可以忽略不计.

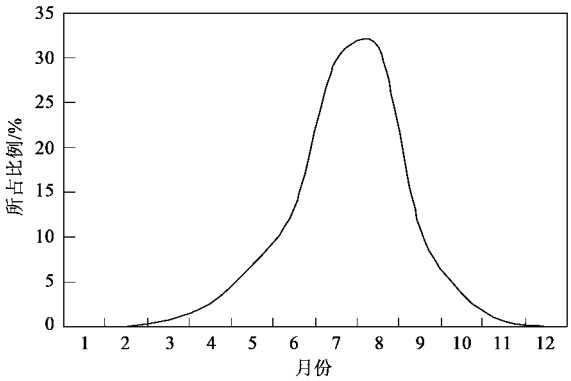

图 3 1980 ~ 2003 年延河流域降雨侵蚀力的年内分配特征

Fig. 3 Seasonal changes of average annual rainfall erosivity in Yanhe River Basin during 1980-2003

从延河流域降雨侵蚀力 R 值年际变化来看(图 4),R 值与降雨量和侵蚀性降雨量年际变化趋势也是一致的. 年降雨量和年侵蚀性降雨量大,则对应的年降雨侵蚀力 R 值也较大. 延河流域多年平均降雨侵蚀力 R 值为1 580.58 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, 1981 年 R 值最大, 达 2 417.70 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$,其次为 2003 年,R 值为 2 242.42 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$,1999 年 R 值最低,仅有 585.29 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$. 侵蚀性降雨量最大值分别出现在 2003 年(398.39 mm)和 1981 年(388.68 mm),其降雨侵蚀力最大值也出现在 2003 年和 1981 年,降雨侵蚀力 R 值最低的 1999 年,其侵蚀性降雨量相应也最低,仅为 123.82 mm. 因各年份间侵蚀性降雨量差异并不大,因此降雨侵蚀力 R 值年际间变异系数为 0.32,为中等变异,即延河流域降雨侵蚀力年际差异并不显著. 而史东梅等[13] 对重庆涪陵区降雨侵蚀力年内年际变化特征研究结果表明其年际间具有显著差异,这可能是与研究区域降雨气候因素的特征差异造成的.

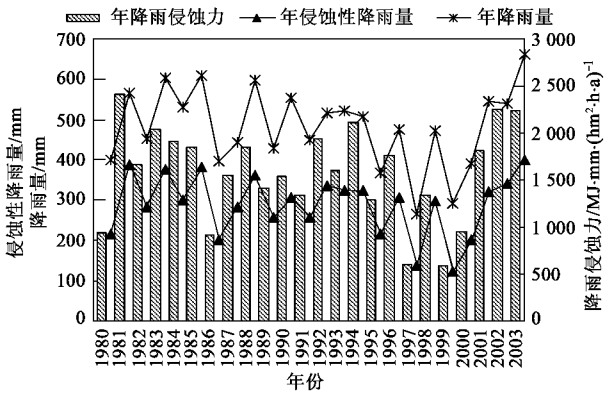

图 4 1980 ~ 2003 年延河流域年降雨量、年侵蚀性降雨量及年降雨侵蚀力变化

Fig. 4 Annual changes of average rainfall, erosive rainfall and average rainfall erosivity in Yanhe River Basin during 1980-2003

2.3 降雨侵蚀力空间变化特征

延河流域 22 个雨量站多年平均降雨侵蚀力 Kriging 空间插值(图 5)表明,流域南部雨量站的降雨侵蚀力 R 值较其它雨量站明显大些. 流域南部降雨侵蚀力 R 值等值线约为 2 000 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, 中东部约为 1 600 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$, 北部约为 1 450 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$. 这与图 2 中年平均侵蚀性降雨量空间分布特征是一致的. 从表 2(延河流域各雨量站降雨侵蚀力统计特征值)同样可发现,延河流域南部烧房砭站多年平均降雨侵蚀力 R 值最大,为2 190.33 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$,北部杨山站和镰刀湾站多年平均降雨侵蚀力 R 值最小,分别为1 151.37 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$和1 146.87 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$. 斗咀村站 R 值变幅最大,为5 521.11 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$,镰刀湾 R 值变幅最小, 为 2 033.33 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$. 各雨量站 R 值的变异系数均为中等变异,变化幅度在 0.33 ~ 0.81 之间,表明其变异情况基本一样,这主要是由于各地区年际间降雨量差异较小. LSD 多重比较表明,降雨侵蚀力 R 值最大的烧房砭站除与 R 值最小的镰刀湾和杨山站存在显著差异外,其与化子坪,谭家营、大路沟、康

表 2　1980 ~ 2003 年延河流域雨量站降雨侵蚀力统计特征值[1)]

Table 2　Statistical characteristic value of rainfall erosivity for rainfall stations in Yanhe River Basin during 1980-2003

站点	均值/MJ·mm·(hm²·h·a)⁻¹	最小值/MJ·mm·(hm²·h·a)⁻¹	最大值/MJ·mm·(hm²·h·a)⁻¹	变异系数
烧房砭	2 190.33 ± 1 040.28a	575.85	4 761.81	0.47
金盆湾	1 913.07 ± 773.60ab	504.08	3 169.79	0.40
龙寺	1 776.39 ± 582.93ab	966.53	3 072.68	0.33
沿河湾	1 735.46 ± 1 050.38ab	429.95	3 840.81	0.61
庙岸	1 704.61 ± 751.80ab	333.70	3 398.95	0.44
斗咀村	1 703.38 ± 1 377.56ab	238.99	5 760.10	0.81
甘谷铎	1 771.94 ± 793.85b	285.40	3 566.30	0.48
白家川	1 664.71 ± 937.51b	624.96	4 584.44	0.56
王窑	1 627.05 ± 542.52bc	542.52	2 789.35	0.33
寺沟	1 610.42 ± 915.79bc	353.99	3 783.06	0.57
黑家堡	1 586.86 ± 763.16bc	544.46	3 758.13	0.48
吊沟	1 543.42 ± 824.64bc	320.39	3 485.04	0.53
大路沟	1 540.31 ± 822.26bc	422.03	3 344.12	0.53
杏河	1 516.27 ± 754.44bc	399.60	3 289.44	0.50
张渠	1 495.65 ± 937.31bc	209.26	3 621.10	0.63
康岔	1 471.42 ± 868.75bc	1.41	3 650.22	0.59
谭家营	1 451.42 ± 611.47bc	657.77	3 282.5	0.42
化子坪	1 445.98 ± 1 052.83bc	99.73	4 106.32	0.73
青化砭	1 444.73 ± 839.30bc	50.39	3 032.84	0.58
张川河	1 360.19 ± 767.70bc	182.31	3 128.38	0.56
杨山	1 151.37 ± 888.62c	17.53	3 888.60	0.77
镰刀湾	1 146.87 ± 579.63c	158.11	2 191.49	0.51

1)数值以算术平值 ± 标准差的形式表示;同行数据后不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)

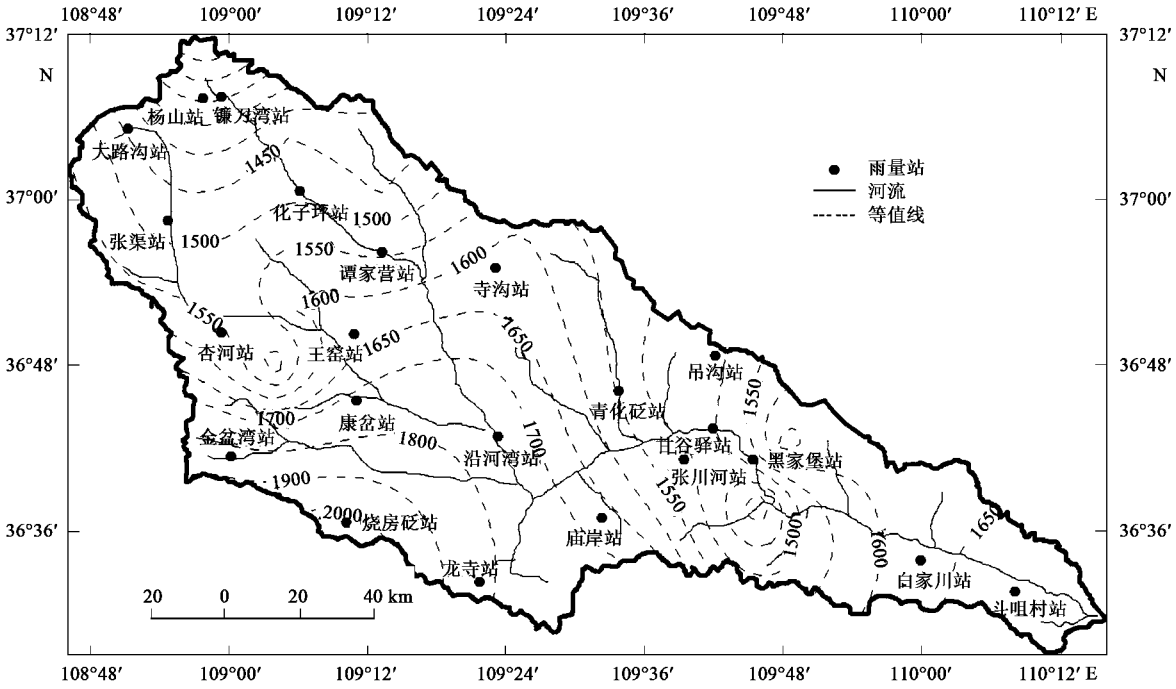

图 5　1980 ~ 2003 年延河流域平均降雨侵蚀力等值线图

Fig. 5　Isogram distribution of average rainfall erosivity in Yanhe River Basin during 1980-2003

岔、寺沟、青化砭、甘谷铎、吊沟、黑家堡、张川河、白家川、张渠、杏河、王窑站均存在显著差异,镰刀湾和杨山站除与烧房砭站存在显著差异外,其与沿河湾、龙寺、庙岸、甘谷铎、白家川、斗咀村、金盆湾站也存

在显著差异（$p<0.05$）.

2.4 降雨侵蚀力变化趋势系数

通过对延河流域降雨侵蚀力趋势系数（r_{xt}）空间分布（图6）分析发现，1980～2003 年间延河流域 22 个雨量站中，降雨侵蚀力年际变化趋势系数（r_{xt}）出现不同程度的正负趋势，即各雨量站因降雨不同引起的降雨侵蚀力具有不同的年际变化趋势. 其中杏河，寺沟、谭家营、镰刀湾、杨山、化子坪、大路沟、张渠和王窑 9 个雨量站降雨侵蚀力趋势系数（r_{xt}）为正，即在所计算 24 a 间降雨侵蚀力呈现轻微的增加趋势，杨山站的增加趋势较为明显，趋势系数（r_{xt}）值为 0.032；康岔，沿河湾、烧房砭、龙寺、庙岸、青化砭、甘谷驿、吊沟、黑家堡、张川河、白家川、斗咀村和金盆湾站降雨侵蚀力年际变化则呈现出负趋势，即在所计算 24 a 间降雨侵蚀力呈现降低趋势，平均趋势系数（r_{xt}）值为 −0.016，其中庙岸站降雨侵蚀力 R 值降低趋势较大，系数为 −0.033，白家川站降雨侵蚀力 R 值降低趋势最小，（r_{xt}）值为 −0.002. 年平均趋势系数（r_{xt}）值为 −0.004，表明 1980～2003 年间延河流域降雨侵蚀力总体上呈现下降趋势. 降雨侵蚀力 R 值这种年际变化特征与降雨量和降雨强度密切相关，以庙岸站和镰刀湾站为例，庙岸站 1980～1990 年间平均降雨侵蚀力 R 值为 2 050.89 MJ·mm·（hm^2·h·a）$^{-1}$，1990～2000 年间平均降雨侵蚀力 R 值下降到 1 353.77 MJ·mm·（hm^2·h·a）$^{-1}$，而同期的年降雨量却从 357.27 mm 下降到 267.38 mm；镰刀湾站 1980～1990 年间平均降雨侵蚀力值 1 001.79 MJ·mm·（hm^2·h·a）$^{-1}$，1990～2000 年间平均降雨侵蚀力 R 值下降到 1 205.17 MJ·mm·（hm^2·h·a）$^{-1}$，而同期的年降雨量却从 218.27 mm 下降到 196.28 mm. 通过对日降雨资料分析发现，该雨量站的降雨量在年际变化上虽然略有减少趋势，但其暴雨（日雨量≥50 mm，雨强大）以上的降雨量和降雨次数呈上升趋势，因此降雨侵蚀力年际变化仍表现出增加趋势.

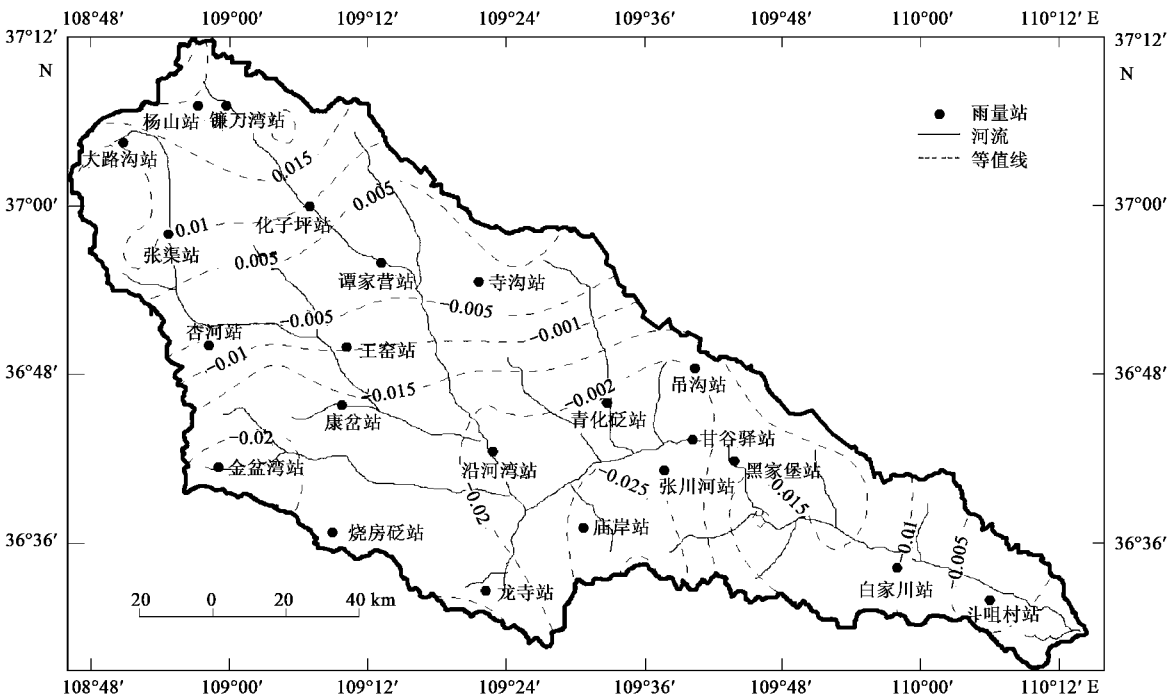

图 6 1980～2003 年延河流域年降雨侵蚀力趋势系数等值线图

Fig. 6 Isogram distribution of the trend coefficient in Yanhe River Basin during 1980-2003

3 结论

（1）延河流域降雨侵蚀力年内年际变化与降雨量和侵蚀性降雨量年内年际变化总体趋势一致. R 值年内变化为单峰型，集中分布在 5～9 月，可占年 R 值的 91.61%，最大值出现在 8 月，为 480.48 MJ·mm·（hm^2·h·a）$^{-1}$，占年 R 值的 30.31%，1、11、12 月这 3 个月 R 值总和共占年 R 值的 0.57%. 降雨侵蚀力年均值为 1 580.58 MJ·mm·（hm^2·h·a）$^{-1}$，最高值（1981 年）为 2 417.70 MJ·mm·（hm^2·h·a）$^{-1}$，最低值（1999 年）仅 585.29 MJ·mm·（hm^2·h·a）$^{-1}$，其年际间

R 值变异不显著,为中等变异,变异系数为 0.32.

(2)降雨侵蚀力空间分析表明,侵蚀性降雨量与降雨侵蚀力空间分布具有一致的趋势.延河流域南部侵蚀性降雨量最大的烧房砭站,多年平均降雨侵蚀力最大,R 值为 2 190.33 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$,北部侵蚀性降雨量较小的杨山站和镰刀湾站,其多年平均降雨侵蚀力也最小,R 值分别为1 151.37 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$和1 146.87 MJ·mm·(hm^2·h·a)$^{-1}$.各站点 R 值年际变化变异系数均为中等变异,变异系数在 0.33~0.81 之间,表明各站点年际间变异情况基本一致.LSD 显著性检验表明,R 值最大的烧房砭站除与邻近的沿河湾、龙寺、庙岸、金盆湾,斗咀村站没有显著差异外,与其它站点均存在显著差异.R 值最小的镰刀湾站和杨山站除与烧房砭站存在显著差异外,其与沿河湾、龙寺、庙岸、甘谷铎、白家川、斗咀村,金盆湾站也存在显著差异.

(3)杏河、寺沟、谭家营、镰刀湾、杨山、化子坪、大路沟、张渠和王窑 9 个雨量站降雨侵蚀力年际变化呈现轻微增加趋势,杨山站的增加趋势相对最为明显,趋势系数(r_{xt})值为 0.032;其它站点 R 值年际变化则呈现降低趋势,平均趋势系数(r_{xt})值为 -0.016,其中庙岸站降雨侵蚀力 R 下降趋势最大,系数为 -0.033.延河流域多年平均趋势系数(r_{xt})值为 -0.004,表明研究时段内降雨侵蚀力总体上呈现下降趋势.

致谢:感谢雷廷武研究员在本文写作和修改过程中提出了宝贵的建议,感谢黄河水利科学研究院姚文艺高级工程师给本研究提供了部分数据,感谢 David Warrington 博士对本文英文摘要进行了润色.

参考文献:

[1] 索安宁,王天明,王辉,等. 基于格局-过程理论的非点源污染实证研究:以黄土丘陵沟壑区水土流失为例[J]. 环境科学,2006,**27**(12):2415-2420.

[2] 潘竟虎. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤侵蚀情景模拟——以甘肃省静宁县清水沟流域为例[J]. 自然资源学报,2009,**24**(4):577-584.

[3] 张岩,朱清科. 黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2006,**20**(6):99-103.

[4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Agriculture Handbook, USDA, 1978. 537.

[5] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, *et al*. Predicting soil Erosion By Walter: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. National Technical Information Service, USDA, 1997.

[6] 殷水清,谢云. 黄土高原降雨侵蚀力时空分布[J]. 水土保持通报,2005,**25**(4):29-33.

[7] 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):265-270.

[8] 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,**9**(1):13-18.

[9] 卜兆宏,董勤瑞,周伏建,等. 降雨侵蚀力因子算法的初步研究[J]. 土壤学报,1992,**29**(4):408-417.

[10] 王万中,焦菊英,郝小品,等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(Ⅰ)[J]. 水土保持学报,1995,**9**(4):5-18.

[11] 王万中,焦菊英,郝小品,等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(Ⅱ)[J]. 水土保持学报,1996,**2**(1):29-39.

[12] 吴志峰,刘平,王继增,等. 广东省降雨侵蚀力时间变化初步分析[J]. 亚热带水土保持,2005,**17**(1):34-37.

[13] 史东梅,江东,卢喜平,等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征[J]. 农业工程学报,2008,**24**(9):16-21.

[14] 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.

[15] 伍育鹏,谢云,章文波. 国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J]. 水土保持学报,2001,**15**(3):31-34.

[16] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,**25**(1):35-41.

[17] 胡续礼,潘剑君,杨树江,等. 几种降雨侵蚀力模型的比较研究[J]. 水土保持通报,2006,**26**(1):68-70.

[18] 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**: 287-306.

[19] Yu B, Rosewell C J. A robust estimator of the R-factor for the universal soil loss equation [J]. Transact Ions of the ASAE, 1996, **39** (2): 559-561.

[20] 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):35-37,128.

[21] 宁丽丹,石辉. 利用日雨量资料估算西南地区降雨侵蚀力[J]. 水土保持研究,2003,**10**(4):183-186.

[22] 章文波,谢云. 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.

[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] 任国玉,吴虹,陈正洪,等. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报,2000,**11**(3):322-310.

[25] 施能,陈家其,屠其璞,等. 中国近 100 年来 4 个年代际气候变化特征[J]. 气象学报,1995,**53**(4):431-439.

[26] 任朝霞,杨达源. 西北干旱区近 50 年气候变化特征与趋势[J]. 地球科学与环境学报,2007,**29**(1):99-102.