

山东省降雨侵蚀力空间分布特征及简易方程的研究^{*}

马 良^{1,3}, 左长清², 孙 勖⁴, 李洪梅⁵

(1. 北京师范大学 资源学院 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 水利部 水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 山东省水利科学研究院 山东省水 资源与水环境重点实验室, 济南, 250013; 4. 山东大学, 济南 250100; 5. 山东省农业规划设计院, 济南 250013)

摘 要: 研究基于山东省境内 22 个气象站 1951—2008 年间日降雨资料, 计算了该省多年降雨侵蚀力因子 R 值, 运用径向基函数空间插值法, 分析了该省降雨侵蚀力的空间分布特征, 同时借助年降雨量与年降雨侵蚀力之间的数量关系, 建立并验证了山东省年降雨侵蚀力的简易经验方程。

关键词: 降雨侵蚀力; 空间插值; 年降雨量; 简易方程; 山东省

中图分类号: P331.1; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)02-0028-04

Spatial Characteristics and Simplified Empirical Models of Annual Rainfall Erosivity in Shandong Province

MA Liang^{1,3}, ZUO Chang-qing², SUN Meng⁴, LI Hong-mei⁵

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research Center on Soil and Water Conservation of the Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China; 3. Key Laboratory of Water Resources and Environment of Shandong Province, Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250013, China; 4. Shandong University, Ji'nan 250100, China; 5. Shandong Agricultural Planning & Design Institute, Ji'nan 250013, China)

Abstract: On the basis of daily precipitation database collected in 22 meteorological stations in Shandong province from 1951 to 2008, the annual rainfall erosivity factor(R) is analyzed in this paper. The spatial interpolation of radial basis functions is applied to develop the spatial characteristics of R in Shandong province. The highest average annual rainfall erosivity occurred in the southeastern part of the province, and decreased from the east to the west, from the south to the north. Erosivity in the national and provincial key control of water erosion zones is higher than others. In the study, the simplified empirical models derived by the relationship of annual rainfall amount and erosivity, for estimating the annual rainfall erosivity factor R are calibrated and validated by using the coefficient of determination and the Nash-Sutcliffe efficiency (E_{ns}).

Key words: rainfall erosivity; spatial interpolation; annual rainfall; empirical model; Shandong province

作为表征降雨对土壤潜在侵蚀能力的特征值, 降雨侵蚀力因子自 20 世纪 50 年代中后期提出并应用于通用土壤流失方程(USLE)以来, 一直备受关注。研究降雨侵蚀力过去变化及未来趋势已成为揭示土壤水蚀对气候变化响应的一项基础性研究内容^[1]。国内外对降雨侵蚀力的研究内容涉及计算方

程、时空特征、简易方程等^[2-5]。

应用山东全省境内 22 个气象站的逐日降雨数据, 对 1951—2008 年逐年降雨侵蚀力进行计算, 运用径向基函数空间插值探寻全省多年年均侵蚀力的空间分布特征, 同时借助 SPSS 软件拟合了全省年降雨侵蚀力的简易方程, 并进行了方程验证。通过

^{*} 收稿日期: 2009-09-21

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901047); 国家“973”重点基础研究发展计划(2006CB400505)

作者简介: 马良(1980—), 男, 山东东阿人, 博士研究生, 主要从事水土流失防治规律、生态水文方向的研究。E-mail: maliang@ires.cn

通信作者: 左长清(1956—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 教授级高工, 长期从事水土流失防治规律研究。E-mail: zuochq@sina.com

本研究,可更好地了解该省降雨潜在侵蚀差异和区域土壤侵蚀背景,对研究降雨变化对全省降雨侵蚀力的影响奠定基础,并为水土流失防治、水土保持规划和技术管理提供科学依据。

1 研究方法数据来源

1.1 降雨侵蚀力的算式

研究采用日雨量资料进行降雨侵蚀力的计算,如式(1)^[5]。

$$R_i=\alpha\sum_{j=1}^k(D_j)^\beta \tag{1}$$

式中: R_i ——第 i 个半月时段的侵蚀力值($\text{J}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{h}$); k ——该半月时段内的天数; D_j ——半月时段内第 j 天的日雨量,要求日雨量 $\geq 12\text{ mm}$ (12 mm 与侵蚀性降雨标准对应); α β ——模型参数,反映了区域降雨特征,可通过式(2)、(3)计算。

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

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

式中: P_{d12} ——日降雨量 $\geq 12\text{ mm}$ 的日平均雨量; P_{y12} ——日降雨量 $\geq 12\text{ mm}$ 的年平均雨量。

最终以式(1)–(3)计算出各半月的降雨侵蚀力统计得出逐年降雨侵蚀力。

1.2 空间插值方法

研究降雨侵蚀力的空间分布特征,普遍采用空间插值的方法^[6],即利用已知的部分空间样本降雨侵蚀力信息,对未知空间的信息进行估计。本研究选用径向基函数法(Radial Basis Functions)作为空间插值方法。该法主要利用基函数来确定周围已知数据点到内插网格节点的最佳权重,内插所得的表面必须通过研究范围内的每一个已知样本点,属人工神经网络方法中的一种^[7]。有研究认为,径向基函数插值方法在散乱数据插值方法中的结果最令人满意^[8]。

1.3 简易方程的建立与验证

研究中将 58 a 分为两时段,利用前 29 a 数据建立并校准方程,即校准期。采用 SPSS 软件提供的 11 类方程探寻年降雨侵蚀力与其他降雨特征指标之间的相关关系,建立及校准最佳简易方程。

后 29 a 数据作为方程的检验和验证,即验证期。计算决定系数(r^2)、Nash–Suttcliffe 效率系数(E_{ns})来比较简易方程计算的年侵蚀力 P_i (模拟值)与式(1)–(3)计算的结果 O_i (实测值)之间的吻合程度,评估简易方程的模拟效果。决定系数(r^2)、Nash–Sut-

cliffe 效率系数的公式如(4)、式(5)。

$$r^2=\frac{[\sum_{i=1}^n(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n(O_i-\bar{O})^2\sum_{i=1}^n(P_i-\bar{P})^2} \tag{4}$$

$$E_{ns}=1-\frac{\sum_{i=1}^n(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^n(O_i-\bar{O})^2} \tag{5}$$

式中: P_i ——模拟值; O_i ——实测值; \bar{O} ——实测值的平均值; \bar{P} ——模拟值的平均值; n ——数据个数。

当 $P_i=O_i$ 时, $r^2=1$, $E_{ns}=1$ 。决定系数及 E_{ns} 的值越小反映出数据吻合程度越低,说明方程的可信度越低。一般要求方程的选取要求模拟值与实测值之间的决定系数 $r^2>0.6$ 且 $E_{ns}>0.5$ ^[9]。

1.4 数据来源与预处理

计算全省降雨侵蚀力所需资料来自“中国气象科学数据共享服务网”提供的“中国地面气象数据”。共搜集到全省 32 个气象站日降雨资料,通过对测站的筛查和缺失数据的插补,最终确定了 22 个有效站点和 1951–2008 共 58 a 的降雨时间序列。

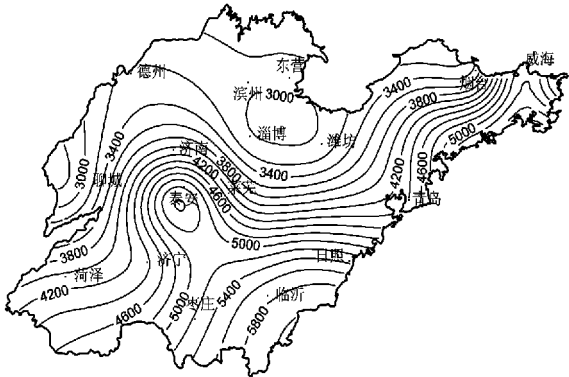


图 1 山东省多年年均降雨侵蚀力等值线图

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力空间特征分析

根据式(1)–(3)的计算,全省多年平均降雨侵蚀力为 $4\,254.46\text{ J}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ (表 1)。通过径向基函数空间差值,绘制了多年年均降雨侵蚀力等值线图(如图 1)。从图 1 可直观发现,全省降雨侵蚀力总体上呈现由西向东、由北向南递增的规律,出现的峰值中心位于鲁东南临沂附近的鲁苏省界,最高可达 $6\,000\text{ J}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 以上,另在鲁中徂徕山、胶东昆嵛山附近分别存在两个较高侵蚀力中心。而黄河三角洲、鲁西鲁冀省界附近出现了两个低谷。国家级水土流失重点治理区——沂蒙山治理区,以及该省的水蚀重点治理区的鲁中南中低山丘陵区、

胶东半岛丘陵区降雨侵蚀力较高。因此在未来需有测预报这些地区降雨侵蚀力的未来变化趋势,以减
针对性加强上述地区的水土流失防治措施研究,预少水土流失防治成本,提高农业生产的适应性。

表 1 山东省 22 站点多年年均降雨侵蚀力一览表

序号	站台 编号	站台名	α	β	年均降雨侵蚀力/ ($\text{J} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	序号	站台 编号	站台名	α	β	年均降雨侵蚀力/ ($\text{J} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	54714	德州	1.327	1.474	3202.64	13	54843	潍坊	1.034	1.526	3101.84
2	54725	惠民	1.176	1.499	3124.01	14	54852	莱阳	1.577	1.439	4470.02
3	54736	东营	1.176	1.499	3030.66	15	54857	青岛	1.478	1.452	4434.78
4	54753	龙口	1.015	1.530	3174.97	16	54863	海阳	1.735	1.420	5152.08
5	54765	烟台	0.798	1.582	3507.92	17	54871	石岛	1.789	1.414	5651.78
6	54774	威海	1.753	1.418	5154.31	18	54906	荷泽	1.642	1.431	4190.42
7	54776	成山头	1.700	1.424	4671.94	19	54916	兖州	1.523	1.446	4418.40
8	54808	莘县	1.137	1.506	2858.74	20	54936	莒县	1.667	1.428	5331.43
9	54823	济南	1.449	1.456	4159.44	21	54938	临沂	1.675	1.427	5783.96
10	54827	泰安	1.816	1.411	5372.09	22	54945	日照	1.762	1.417	5725.85
11	54830	淄博	1.044	1.524	3125.93						
12	54836	沂源	1.295	1.479	3954.96		全省				4254.46

表 2 山东省年降雨侵蚀力简易方程一览表

序号	站台编号	站台名	年降雨侵蚀力简易方程	决定系数(r^2)	E_{ns}
1	54714	德州	$R=0.116P_a^{1.612}$	0.897	0.893
2	54725	惠民	$R=0.216P_a^{1.502}$	0.839	0.589
3	54736	东营	$R=0.145P_a^{1.560}$	0.878	0.874
4	54753	龙口	$R=0.336P_a^{1.428}$	0.781	0.779
5	54765	烟台	$R=0.097P_a^{1.607}$	0.755	0.754
6	54774	威海	$R=0.142P_a^{1.577}$	0.845	0.821
7	54776	成山头	$R=0.133P_a^{1.586}$	0.884	0.881
8	54808	莘县	$R=0.123P_a^{1.593}$	0.867	0.864
9	54823	济南	$R=0.139P_a^{1.570}$	0.882	0.878
10	54827	泰安	$R=0.195P_a^{1.523}$	0.803	0.654
11	54830	淄博	$R=0.090P_a^{1.615}$	0.970	0.915
12	54836	沂源	$R=0.168P_a^{1.527}$	0.912	0.907
13	54843	潍坊	$R=0.109P_a^{1.588}$	0.834	0.825
14	54852	莱阳	$R=0.230P_a^{1.500}$	0.878	0.874
15	54857	青岛	$R=0.077P_a^{1.659}$	0.922	0.920
16	54863	海阳	$R=0.297P_a^{1.467}$	0.884	0.880
17	54871	石岛	$R=0.457P_a^{1.405}$	0.878	0.873
18	54906	荷泽	$R=0.064P_a^{1.706}$	0.846	0.840
19	54916	兖州	$R=0.257P_a^{1.484}$	0.861	0.855
20	54936	莒县	$R=0.164P_a^{1.547}$	0.931	0.932
21	54938	临沂	$R=0.279P_a^{1.466}$	0.927	0.926
22	54945	日照	$R=0.331P_a^{1.443}$	0.943	0.942
	全省		$R=0.138P_a^{1.572}$	0.887	0.886

2.2 年降雨侵蚀力简易方程的建立与验证

由于降雨侵蚀力的计算需要有长期完整的降雨过程线,这对于一些没有自记降雨设备的观测点来说计算十分困难。因此,国内外的许多研究在寻找降雨侵蚀力的简易方程。许多研究认为年降雨量(P_a)与年降雨侵蚀力(R)之间在数量上有较好的相关性,表现为幂函数关系^[10+11]。

本研究基于 1951– 1979 年逐年雨量及日雨量公式(1)– (3) 计算所得的逐年降雨侵蚀力数据,借助

SPSS 软件提供的 11 类方程对全省进行了年降雨侵蚀力简易方程的拟合,通过决定系数筛选并校准了以幂函数为最佳形式的简易方程,详见表 2。根据简易方程计算出的 1980– 2008 年逐年降雨侵蚀力(P_i),与基于日雨量公式结果(O_i)比较,按式(4)– (5)求得决定系数 r^2 与 Nash– Scetclife 效率系数 E_{ns} 。验证结果显示,全省年降雨侵蚀力简易方程均满足 $r^2 > 0.6$ 且 $E_{ns} > 0.5$ 的要求,可信度较高。

3 结 论

应用山东全省 22 个气象站点 58 a 间逐日降雨数据, 对该省多年降雨侵蚀力进行计算, 并探寻了侵蚀力的空间分布特征, 同时借助 SPSS 软件建立并验证了山东省年降雨侵蚀力的简易方程, 为方便在该省缺少自记雨量资料地区计算降雨侵蚀力, 更进一步研究全省土壤水蚀对降雨变化响应奠定了基础。

结果显示: 山东省多年年均降雨侵蚀力为 $4\,254.46(\text{J}\cdot\text{mm})/(\text{m}\cdot\text{h})$, 并且呈现由西向东、由北向南递增的规律, 峰值中心出现在鲁东南临沂附近的鲁苏省界。山东省境内 3 个国家级、省级水蚀重点治理区的降雨侵蚀力总体偏高, 未来应加强这 3 个地区降雨侵蚀力变化、针对性防治措施的研究。

参考文献:

[1] Nearing M A, Pruski F F, O’Neal M R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 59(1): 43- 50.

[2] Yu B, Hashim G M, Eusof Z. Estimating the R- factor using limited rainfall data: a case study from Peninsular Malaysia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 56(2): 101- 105.

[3] Yu B, Rosewell C J. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts for South Australia[J]. Austral

ian Journal of Soil Research, 1996, 34(5): 721- 733.

[4] Bullock P R, Dejong E, Kiss J J. An assessment of rainfall erosion potential in Southern Saskatchewan from daily rainfall records[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1989, 32(1): 17- 24.

[5] 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.

[6] Goovaerts P. Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity[J]. Catena, 1999, 34(3/ 4): 227- 242.

[7] 魏义坤, 杨威, 刘静. 关于径向基函数插值方法及其应用[J]. 沈阳大学学报, 2008, 21(1): 7- 9.

[8] Franke R. Scattered data interpolation: test of some methods[J]. Mathematics of Computation, 1982, 38: 181- 200.

[9] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2001, 44(6): 1559- 1570.

[10] 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(4): 287- 306.

[11] Yu B, Rosewell C J. A robust estimator of the R- factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1996, 39(2): 559- 561.

(上接第 27 页)

[3] 姚文艺, 陈国祥. 雨滴降落速度及终速公式[J]. 河海大学学报, 1993, 21(3): 21- 27.

[4] 吴长文, 陈法杨. 坡面土壤侵蚀机理研究进展与现状[J]. 中国水土保持, 1996, 11: 21- 24.

[5] 吴普特, 周佩华. 雨滴击溅对坡面薄层水流阻力系数的影响[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 39- 42.

[6] 姚文艺. 坡面流阻力规律研究[J]. 泥沙研究, 1996(3): 74- 84.

[7] Kinnel P I A. sediment transport by medium to large drops impacting flows at subterminal velocity[J]. Soil Sci. Soc Am. J., 2005: 69: 902- 905.

[8] Kinnel P I A. Sediment concentration resulting from flow depth/drop size interactions in shallow overland flow Trans[J]. ASAE, 1993, 36(4): 1099- 1103.

[9] Kinnel P I A. Sediment transport by shallow flows impacted by pulsed artificial rainfall[J]. Aust. J. Soil Sci., 1993, 31: 199- 207.

[10] Kirkby M J. Hillslope Hydrology[M]// John Wiley &

Sons. Chinchester New York Brisbane, 1978: 145- 293.

[11] 雷阿林. 坡沟系统土壤侵蚀链通力机制模拟实验研究[D]. 陕西 杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1996.

[12] Selby M J. Hillslope materials & processes[M]. Oxford University press, 1993.

[13] Gunn R, Kinzer G D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air [J]. J. Meteorol., 1949, 6: 243- 248.

[14] Laws J O, Parsons D A. The relation of raindrop size to intensity [J]. Eos Trans. AGU, 1943, 24: 452- 459.

[15] Schmidt J. Modelling long- term soil loss and landform change, in overland flow [M]//Parsons A J, Abrahams A D. Hydraulics and Erosion Mechanics. New York: Chapman and Hall, 1993: 409- 443.

[16] 敬向锋, 吕宏兴, 潘成忠, 等. 坡面薄层水流流态判别方法的初步探讨[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 56- 61.