

WEPP 水蚀预报流域模型*

刘宝元 史培军

(北京师范大学资源与环境科学学院·北京·100875)

摘要 WEPP 是“新一代水蚀预报技术”开发的计算机土壤侵蚀预报模型,可用于水土保持规划、环境规划及评价。WEPP 是以随机天气生成模型、入渗理论、水文学、土壤物理、作物科学、水力学和侵蚀力学为基础开发的,它在坡面的应用及流域版的基本功能使它比现有侵蚀预报模型有明显优越性,主要包括:(1) 估算土壤侵蚀时空分布即全坡面或坡面任一点的净土壤流失量及其随时间的变化。(2) WEPP 模型是过程模型,可应用于更广泛的条件下。主要介绍了 WEPP 模型流域版的基本概况和用美国 6 个不同地方 15 个小流域实测资料的检验结果。 中图分类号: S157.1

关键词: 水蚀预报 WEPP 模型 敏感性分析

Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model for Watershed Scale

Liu Baoyuan Shi Peijun

(Beijing Normal University, Beijing, 100875, PRC)

Abstract The Water Erosion Prediction Project (WEPP) watershed scale model was developed by the USDA for soil erosion assessment and conservation planning. Several sensitivity analyses and evaluation studies have been conducted for the WEPP hillslope version, but few efforts have been made to evaluate the accuracy of WEPP watershed model predictions by comparing predicted results to measured data. The purpose of this study was to give a brief introduction of WEPP watershed model and to evaluate the WEPP watershed model applicability and prediction accuracy for small watersheds under different climates, topographies, soils, and managements. Data from 15 watersheds of 6 locations in the United States were compared to runoff and sediment yield estimates using WEPP95. The result shows that the WEPP predicted reasonable average annual and event runoff and sediment yield with default parameter estimation procedures for most of the sites and individual watersheds. Model efficiencies for storm by storm runoff and sediment yield were quite reasonable for general conditions. The distributions of measured and predicted events were similar. This study also pointed out the potential areas for model improvement, including better and more specific silage routines, in addition of a weed component to the plant growth and management model, and better linkage of the sediment from contoured hillslopes to the watershed channel system.

Keywords: water erosion prediction; WEPP modelling; sensitivity analyses and evaluation

土壤侵蚀预报模型作为了解土壤侵蚀过程与强度,掌握土地资源发展动态,指导人们合理利用土地资源,管理和维持人类长期生存环境的重要技术工具,受到各国的普遍重视。过去几十年来虽然有不少模型发表,但在实际应用中还是以 USLE (Universal Soil Loss Equation,

通用土壤流失方程式)为主^[1,2]。USLE用了30a多后已觉得有明显不足和限制^[3]。1985年美国在印第安纳的Lafayette举行的一次学术讨论会上认为已有能力和必要开发新一代土壤侵蚀预报技术。新的模型应基于对土壤侵蚀过程的新认识上,在使用方面,除了与USLE有同样的用途外,还应有其它新的用途。在那次会后,农业部着手10a的研究项目,目的是开发能代替USLE的土壤侵蚀预报模型^[3]。1986年4家政府部门(农业部农业研究局、土壤保持局、林业局、内政部土地管理局)签署了为期10a开发新一代侵蚀模型的项目——水蚀预报项目(Water Erosion Prediction Project—WEPP)。1987年完成了用户需求报告^[4],规定了WEPP的基本框架,WEPP模型应具备3个版本:坡面版、流域版和网格版。1995年8月在依阿华州(Des Moines, Iowa)举行的WEPP和WEPS(Wind Erosion Prediction Project,风蚀预报系统)学术讨论会上发布了第一个官方正式版本WEPP95。完成了坡面版和流域版,但没有完成网格版。由于WEPP是过程模型,所以比现有侵蚀预报模型有明显优越性,主要包括:(1)估算土壤侵蚀的时空分布即全坡面或坡面任意一点的净土壤流失量及随时间的变化。(2)作为过程模型它可以应用于更广泛的条件下^[5]。

WEPP流域版的工作从1990年开始^[6]。流域版作为坡面版的扩展,用于预报流域径流与土壤侵蚀过程;评价流域内地形、土壤特征、土地利用和农业管理措施对土壤侵蚀的影响。第一个版本1990年完成^[7],以后进行了进一步的改进^[8,9]。1995年发行了正式版本WEPP Version 95.7^[10]。该版本包括3个基本部分:坡面、渠道和蓄水池。渠道部分又可划分为水文和侵蚀两部分。渠道水文部分计算入渗、蒸发蒸散、渗透、植被截留降雨量、地表蓄水及洪峰流量。渠道侵蚀部分计算泥沙量,包括坡面上和渠道中的剥离、搬运与沉积。

1 用户需求和应用范围

WEPP目前只完成了前两个版本(坡面版、流域版)。坡面版可以直接代替USLE,但比USLE的功能更强。自然资源保护局的应用包括资源保护规划和项目规划。流域版可以评价和指导资源管理系统,以保证流域侵蚀速率小于允许侵蚀速率,维持土地生产力。在项目的计划中,流域模型常常作为一个技术工具用于下述几方面。(1)决定流域侵蚀控制的方法及其贡献;(2)模拟流域产沙量和泥沙特征为渠道和蓄水设施设计提供资料;(3)估算泥沙产量和特征,分析对下游水质的影响。土地管理局要求模型简单易用,主要用于侵蚀量估算,使草地侵蚀量低于某一水平,土地生产力没有降低。同时用于草地管理规划,评价放牧系统和草地改良措施对侵蚀的影响等方面。林业局的应用类似于自然资源保护局,主要用于联邦森林和私人林地管理,包括林业规划、项目规划与评估和资源保护计划等。

流域模型只能用于田块尺寸范围内。最大范围大约为 260 hm^2 ,林地也许能用于 800 hm^2 的地块^[4],模型不能用于切沟和河道侵蚀,它只能用于排水沟、草皮水路和农田临时切沟侵蚀预报。对于草地和林地来说,渠道的最大规模必须是小于农田里传统的切沟,即宽度 $1\sim 2\text{ m}$,深度 1 m 。

2 WEPP的基本输入和输出

WEPP主体程序用ANSI FORTRAN 77编写。它有一个方便的接口程序(C语言编写),用于编辑、管理和查看输入参数和输出结果。WEPP的所有输入参数主要包含在 $10\sim 12$ 个文件中,这些输入文件以文本格式编辑和储存,一般都比较容易编辑,只有田间管理文件较为复杂,最好借助“文件创建程序(FILE BUILDER)编辑。气候文件按逐日输入,文件较大可以借

助气候发生器(Weather Generator-CLIGEN)^[11]。这些输入文件是:(1) 气候文件。包括 10 个逐日参数:雨量、降雨历时、最大雨强与平均雨强的比率、最大雨强出现的历时与总历时的比率、最高温度、最低温度、太阳辐射、风向、风速、露点温度。可以逐日输入实测资料,也可以用 CLIGEN 模型自动生成。(2) 地形文件。包括坡度、坡长,必需把复杂的坡面分解成多个单一的直形坡。(3) 植物与田间管理文件。这个文件很复杂,包括很多耕作和作物生长等方面的详细资料,如耕作工具、耕作日期、播种日期、收割日期、残茬管理、耕作深度、耕作后地糙度等等。此外还包括 30 多个植物生长参数,如植物生长量与覆盖的关系参数,生物量与高度的关系参数,生物—能量转换系数及最低、最高生长温度等。(4) 土壤文件。包括 5 个分层土壤基本特性:沙粒含量(%),粘粒含量(%),有机质含量(%),阳离子代换量(Meq/100g)和砾石含量(%)。此外还有土壤名称、质地、反射率、初始饱和度、细沟可蚀性、临界剪切力和有效水力传导率。这 4 个输入文件是最基本的文件,如果有灌溉还需加上灌溉文件。这 5 个文件是坡面版本和流域版本都需要的文件。流域模型需要包括另外 2 个输入文件:结构文件和渠道文件。同时和坡面版一样需要渠道坡度坡长文件、渠道土壤文件、渠道管理文件和渠道气候文件。所以对于一般没有灌溉和蓄水条件的流域主要是 10 个基本的输入文件。它们分别是:坡面气候、土壤、作物、地形;渠道气候、土壤、作物、地形;流域结构及渠道文件;灌溉文件;拦蓄管理文件等。

3 模型的基本理论与模拟过程

WEPP 模型将整个流域划分为 3 部分:坡面、渠道和拦蓄设施。土壤侵蚀过程包括分离、搬运和沉积。分离发生在坡面和渠道中,沉积可以发生在任何地方。暴雨所产生的径流和泥沙先由坡面从上往下传送,再经过渠道或拦蓄设施,最后离开流域出口。在此过程中沿途不断有分离和沉积发生。坡面侵蚀包括细沟侵蚀和细沟间侵蚀。在模拟过程中首先计算坡面上的土壤流失量和坡面低端的产沙量然后模拟渠道过程。坡面流过程概化为片流和细沟流两部分。坡面侵蚀包括细沟间侵蚀和细沟侵蚀。细沟间侵蚀被认为是雨滴打击使土粒分离,然后被片流输送到细沟,由细沟沿坡向下搬运送入渠道或拦蓄设施。细沟侵蚀是径流分离力、泥沙搬运力和泥沙含量的函数。坡面部分先计算径流过程,然后沿坡面从上到下模拟泥沙的分离、搬运、和沉积。只有最后一段坡面上的泥沙进入渠道。坡面模拟结束后,把模拟结果存入一个文件中,然后进行渠道和拦蓄模拟。储存坡面模拟结果的文件叫“传递”文件,主要存储如下信息:暴雨历时、汇流时间、径流深、径流总量、洪峰流量、总分流量、坡面上的总沉积量、各粒级的泥沙含量、各颗粒占总泥沙的比例等。在渠道中,当水力剪切力大于土壤临界剪切力并且泥沙含量小于泥沙搬运力时才出现分离。当泥沙含量大于搬运能力时出现沉积。

概括起来 WEPP 模拟如下过程:(1) 气候模拟,用气候发生器模拟日降雨量、降雨历时等气候要素;(2) 冬天过程,包括土壤冻融、积雪和融雪;(3) 灌溉系统,模拟灌溉类型、灌溉量、径流量和侵蚀量等;(4) 水平衡,模拟入渗、径流、蒸发蒸散、土壤水下渗等;(5) 植物生长,模拟植物逐日生长状况、覆盖度、高度、产量等;(6) 残茬分解,计算地上、地下、站立的和平铺的植物枯枝落叶的分解速率;(7) 土壤参数,利用土壤基本特性计算土壤可蚀性、临界剪切力、水力传导率等;(8) 渠道水文;(9) 渠道侵蚀;(10) 拦蓄沉积等。

4 模型敏感性分析

敏感性分析是检验模型的输出结果对输入参数的反应。Baffaut 等人(1997)^[12]对 WEPP 流域模型进行了敏感性分析。该项研究包括 3 组测试。第 1 组测试是用 1 个 200 m 宽,50 m 长

的坡面,坡面边缘有 200 m 长的排水渠。将坡面沿宽度逐渐划小到 8 个坡面。其它条件保持不变。第 2 组是用 100 mm × 100 mm 的地面进行模拟。首先用 1 个渠道把坡面分成 2 部分,然后逐渐划复杂,最后 1 个测验将流域分成 15 个坡面 9 个渠道。第 3 组测试是对渠道输入参数进行测试。

测试结果表明:坡面长度是个关键参数。流域出口的泥沙产量对总曼宁系数和裸土曼宁系数和渠道坡度最敏感,对渠道边坡不敏感。可蚀性和临界剪切力对发生渠道侵蚀的那些事件敏感。对径流量较小,坡面泥沙贡献较小的事件,流域产沙对水力传导率敏感(表 1)。

表 1 土壤流失敏感性计算值

	年土壤流失敏感性	次土壤流失敏感性(月 日)					
		0109	0501	0504	0802	1012	1223
坡度	0.133	0.210	0.482	0.097	0.383	0.350	0.563
边坡	0.029	-0.081	-0.177	-0.082	-0.056	-0.064	-0.259
总曼宁系数	0.162	-0.770	-1.260	-0.095	-0.297	-0.430	-0.250
裸土曼宁系数	0.332	1.090	1.740	0	0	-0.495	-0.725
临界剪切力	0.045	-0.193	-0.558	0	0	0.221	0.740
可蚀性	0.013	-0.001	-0.008	0	-0.522	-1.000	-0.004

5 WEPP 流域模型的适用性与预报精度

我们选择 6 个地方 15 个小流域(0.34 ~ 5.14 hm²)进行了预报值与实测值的对比(表 2)^[13]。结果表明 WEPP 预报的年径流量与所有小流域实测值吻合得都很好(图 1)。实测值的变幅从俄亥俄州 Coshocton 站的 2.6 mm/a 到密西西比州 Holly Spring 的 500 mm/a, WEPP 都能较好地预报。对于产沙量来说大多数流域预报值相当合理。WEPP 对某流域的泥沙产量绝对值预报不太准确,但对大小等级分的很准确(表 3,图 2)。这对水土保持规划很有意义。

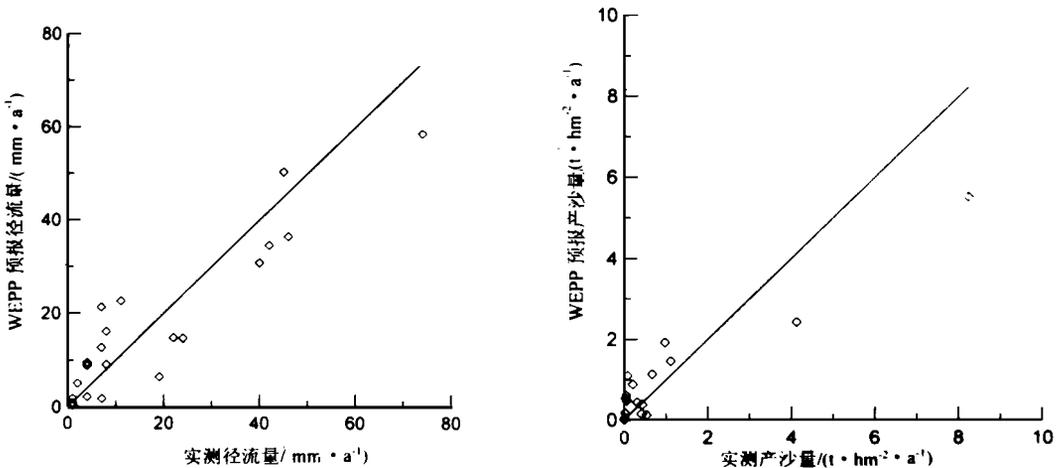


图 1 15 个小流域实测年径流量与 WEPP 预报值比较 图 2 15 个小流域实测年产沙量与 WEP 预报值比较

在所有的检验中我们用了 WEPP 默认土壤入渗参数和可侵蚀性参数值,这说明 WEPP 的土壤参数估算公式较好。从表 3 和图 2 可以看出 WEPP 对 Holly Spring 预报值过高。这主要是由于该站在玉米未成熟时将其割掉作为青饲料,且割掉的比例较小,但 WEPP 的该项模拟认为割掉的比例很大。此外玉米收割后杂草丛生,但 WEPP 没有相应的杂草模拟程序。对于

次暴雨来说,除密西西比以外,预报也相当不错。表 4 表示了 WEPP 模型有效性(Nash and Sutcliffe, 1970) 较高。图 3 和图 4 为小流域的次暴雨预报值和实测值对比。

表 2 用于 WEPP 检验流域模型的 15 个小流域

流域面积/hm ²	试验站	年份	坡度/%	田间管理	土壤
C- 5 5. 18	Chickasha, OK	1971—1978	0.5 ~ 1	农作物	McLain 粉质粘土, 粉质壤土和 Reinach 粉质壤土
109 0. 68	Coshocton, OH	1979—1989	9 ~ 15. 6	玉米, 大豆 ⁽¹⁾	McLain 粉质粘土, 粉质壤土和 Reinach 粉质壤土
191 0. 49	Coshocton, OH	1979—1989	8 ~ 16	免耕玉米 ⁽¹⁾	Berks shaly 粉质壤土, Rayne 粉质壤土
130 0. 66	Coshocton, OH	1987—1993	15. 8 ~ 29. 0	牧草地	Berks shaly 粉质壤土, Rayne 粉质壤土
1 1. 57	Holly Springs, MS	1970—1977	5. 1 ~ 18. 2	农作物	Grenada 粉质壤土
2 0. 59	Holly Springs, MS	1970—1977	6. 2 ~ 10. 9	农作物	Grenada 粉质壤土
3 0. 65	Holly Springs, MS	1970—1977	8. 9 ~ 9. 8	农作物	Grenada 粉质壤土
W- 12 8. 01	Riesel, TX	1987—1992	1 ~ 2. 7	农作物 ⁽¹⁾	Heiden 粉质粘土
W- 13 8. 57	Riesel, TX	1987—1992	1. 3	农作物 ⁽¹⁾	Heiden 粉质粘土
SW- 12 1. 20	Riesel, TX	1987—1992	2. 7 ~ 3. 8	草地	Heiden 粉质粘土
Z 0. 34	Tifton, GA	1969- 1986	3. 6	农作物	Cowarts 沙壤土
P- 1 2. 70	Watkinsville, GA	1972—1982	2 ~ 7	农作物	Cecil 沙壤土和沙质粘土
P- 2 1. 29	Watkinsville, GA	1973- 75	1. 6 ~ 8. 5	农作物	Cecil 沙壤土和沙质粘土
P- 3 1. 26	Watkinsville, GA	1972- 1982	3	农作物	Cecil 沙壤土和沙质粘土
P- 8 1. 40	Watkinsville, GA	1973- 1982	3	农作物	Cecil 沙壤土和沙质粘土

注: (1) 等高耕作

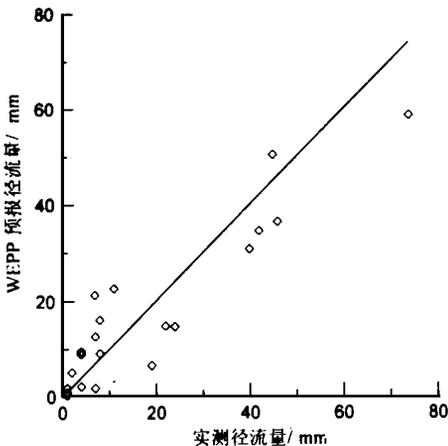


图 3 乔治亚洲 Watkinsville P- 2 流域实测次暴雨径流量与 WEPP 预报值比较

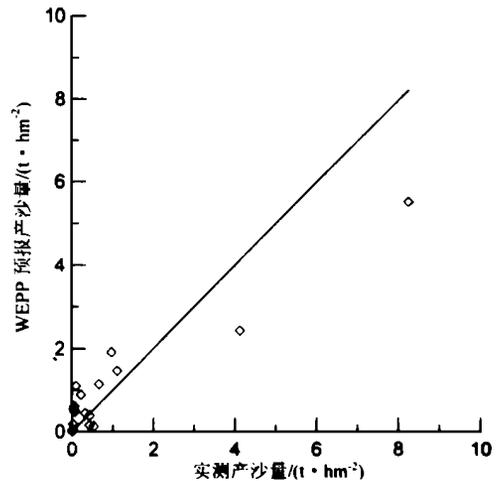


图 4 乔治亚洲 Watkinsville P- 2 流域实测次暴雨泥沙量与 WEPP 预报值比较

通过 WEPP 预报值和实测值的对比分析可以看出: WEPP 流域模型在大多数情况下预报值合理。在模型中,模型较准确地反映了流域径流量与产沙量的不同和等级。这对选择水土保持管理措施非常有益。模型预报的总径流量和总产沙量分布状况和实例分布状况接近。这对评价长期径流和侵蚀类型有益。但此模型也有些需改进的地方,如对密西西比的预报说明 WEPP 需要更好的割草管理子模型和杂草管理部分。WEPP 模型如有等高耕作(Contour)时,泥沙从坡面到渠道的输送模型也有问题。

表 3 年平均径流量与泥沙量

流 域	径流量/mm		泥沙量/(t·m ⁻² ·a ⁻¹)		时间/a
	实测值	预报值	实测值	预报值	
Chickasha C5, OK	96.2	98.5	1.236	1.188	4
Coshocton 109, OH	12.9	9.3	0.282	0.444	11
Coshocton 130, OH	20.1	9.9	0.008	0.424	7
Coshocton 191, OH	2.6	5.8	0.007	0.006	11
Holly Springs 1, MS	465.0	382.8	8.295	19.710	8
Holly Springs 2, MS	482.3	356.8	8.457	15.420	8
Holly Springs 3, MS	340.9	307.2	5.794	9.519	8
Riesel SW- 12, TX	219.5	197.9	—	0.853	6
Riesel W- 12, TX	184.7	163.7	2.643	1.757	6
Riesel W- 13, TX	167.9	161.6	1.812	1.446	6
Tifton Z, GA	64.9	61.2	1.117	1.531	8
Watkinsville P- 1, GA	66.5	70.0	5.830	6.465	11
Watkinsville P- 2, GA	183.0	136.0	6.137	6.699	3
Watkinsville P- 3, GA	63.3	79.6	1.138	1.030	11
Watkinsville P- 8, GA	64.8	82.4	0.690	1.139	10

表 4 次暴雨径流量与泥沙量

流 域	平均次暴雨		平均次暴雨		模型有效性		观测 次数
	径流量/mm		产沙量/(t·hm ⁻²)		径流	泥沙	
	实测值	预报值	实测值	预报值			
Chickasha C5, OK	9.4	9.1	0.125	0.112	0.43	0.79	34
Coshocton 109, OH	6.4	6.4	0.498	0.265	0.00	< 0	4
Coshocton 130, OH	8.2	5.1	0.006	0.184	< 0	< 0	6
Coshocton 191, OH	2.8	2.2	0.009	0.003	< 0	< 0	6
Holly Springs 1, MS	14.4	11.9	0.273	0.648	0.75	0.63	193
Holly Springs 2, MS	14.8	11.0	0.274	0.505	0.73	0.78	208
Holly Springs 3, MS	11.5	10.7	0.209	0.349	0.80	0.17	170
Riesel SW- 12, TX	19.1	16.5	—	0.068	0.65	—	57
Riesel W- 12, TX	7.1	7.3	0.135	0.082	0.69	< 0	117
Riesel W- 13, TX	10.6	11.1	0.125	0.097	0.56	< 0	83
Tifton Z, GA	8.8	7.2	0.145	0.181	< 0	0.19	46
Watkinsville P- 1, GA	18.1	17.2	1.638	2.049	0.71	0.38	33
Watkinsville P- 2, GA	18.0	17.1	0.828	0.866	0.84	0.81	21
Watkinsville P- 3, GA	18.8	17.5	0.279	0.249	0.51	0.63	35
Watkinsville P- 8, GA	14.7	15.0	0.166	0.208	0.70	0.88	36

参 考 文 献

- 1 Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall-Erosion Losses From Cropland East of the Rocky Mountains, Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation, In: Agriculture Handbook No. 282. 1965, Washington, D. C.
- 2 Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses — a guide to conservation planning. In:

- USDA Agriculture Handbook No. 537. Washington, D.C. 1978
- 3 Lafflen J M, Lwonaard J L, Foster G R. WEPP a new generation of erosion prediction technology. J of Soil and Water Cons. 1991, 46(1): 34- 38.
 - 4 Foster G R, Lane L J. User requirements, USDA- Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No. 1, USDA- ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, 1987
 - 5 Nearing M A, Foster G R, Lane L J, Finkner S C. A process-based soil erosion model for USDA- Water Erosion Prediction Project technology. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1587- 1593.
 - 6 Ascough II J C, Baffaut C, Nearing M A, Liu B Y. The WEPP watershed model: I. model description. Trans. ASAE. 1997 (Accepted)
 - 7 Stone J J, Lopes V L, Lane L J (eds.). USDA- Water Erosion Prediction Project: Watershed Model Documentation. Draft Reporty No. 2, USDA- ARS Aridland Watershed Management Research Unit. 1990, Tucson, AZ. 85719.
 - 8 Ascough II J C, Van der Zweep R A, Deer- Ascough L A, Livingston S J, Lafflen J M. WEPP watershed model: background and processes. ASAE Paper 1993, No. 93- 2105. St. Joseph, MI: ASAE.
 - 9 Ascough II J C, Tiscareno- Lopez M, Van der Zweep R A, Deer-Ascough L A, Livingston S J. WEPP watershed model: Applications and progress. ASAE Paper 1993, .No. 93- 2106. St. Joseph, MI: ASAE.
 - 10 Flanagan D C, Nearing M A, Lafflen J M ed. USDA- Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10, USDA- ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, . 1995
 - 11 Nicks A D, Lane L J, Gander G A. Chapter 2. Weather generator. In: Flanagan D C, Nearing M A, Lafflen J M ed. USDA- Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10, USDA- ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, 1995.
 - 12 Baffaut C, Nearing M A, Ascough II J C, Liu B Y. The WEPP watershed model: II. sensitivity and discretization. Trans. ASAE. 1996(Accepted)
 - 13 Liu, B.Y. M. A. Nearing, C. Baffaut, and J.C. Ascough II. The WEPP watershed model: III. Comparisons to measured data. Trans. ASAE. 1997 (Accepted)

mBRIAN, 面向应用的图像处理软件

mBRIAN 是由澳大利亚科工组织(CSIRO)和微型计算机应用有限公司(MPA)合作研制的。本系统除了可以处理遥感图像外,还能处理一般的地理数据并能方便地与GIS配合使用。基本功能有4个。(1) 图像管理:主要功能是编辑和管理图像、地面控制点和其它数据文件,以及利用屏幕显示和打印方式的图像与资料输出。(2) 图像处理:其内容包括对图像进行计算和统计,执行指定的图像变换以及对一定区域进行光谱的或者空间的删除或提取处理。(3) 图像分析:包括对图像特征的分类、统计分析和注记,用取样和交叉列表的方法分析图像分类注记的结果。分析水深,用空间模拟分析侵蚀区等。(4) 图像综合:包括对图像的纠正和定位,图像的重采样,图像的分割与拼接,多时相图像的分析 and 处理。

(中国科学院水利部水土保持研究所遥感信息工程部)