

澱水流域产水产沙自然过程的计算机模拟*

II. 模拟结果与分析

曾志远^{1†} 潘贤章² 李 硕¹

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 叙述了澱水河流域产水量、产沙量等自然过程的模拟结果, 分析了它们的时间变化、空间分布与模拟精度。模拟初始有个热身(warm up)阶段, 特别是对产沙量的模拟。模拟精度随模拟年份增长而降低: 年模拟精度产水量 3 年平均为 98.32%; 8 年平均为 90.27%。产沙量 2 年平均为 88.83%; 8 年平均为 82.51%。模拟年份长到 7~8 年后, 结果趋于稳定。表明此方法可用于流域产水产沙量的中长期年际动态监测。至于月平均模拟精度, 产水量 3 年为 83.84%, 8 年为 86.05%; 产沙量 3 年为 68.80%, 8 年为 59.70%。此方法的模拟结果也可应用于流域自然资源管理。

关键词 动态监测; 模拟精度; 水资源; 土壤侵蚀; 地理过程量化

中图分类号 P962/7.514

文献标识码 A

这里介绍《澱水流域产水产沙等自然过程的计算机模拟 I. 数学模型体系与参数输入研究》^[1] 的模拟结果及其分析。

1 模拟结果

各项输入数据估定和输入之后, 即可启动 SWRRB 程序进行模拟运算, 并输出结果, 包括产水量、产沙量、蒸发量、土壤水分、生物量等 30 余项。据需要和模拟达到的精度, 可分别按年、月或日输出。本研究是按月输出。

由于输入各项绝大部分是分析和估计, 无论考虑如何周密、计算如何精确, 都很难说估计和计算值完全符合实际情况。加之许多值是一个亚区一个值, 亚区仍有相当大面积。因此输入数据的代表性难免不十分恰当, 初步模拟结果一般都不尽如意。因此要对照有限的实测数据(产水量、产沙量等), 分析存在问题, 改变和调整输入参数值, 反复进行模拟实验, 以期使模拟结果最大限度地接近于实际。

输入项目和数据那么多, 改变和调整哪个呢?

这需要在普遍试验的基础上进行各项输出对各项输入的敏感性分析(Sensitivity analysis), 以确定各项输入对各项输出影响或敏感性的大小。针对输出项目数值过大或过小(对照有限的实测值, 在本研究中是产水量和产沙量), 有选择、有目的地改变输入项目的量值, 从而较快的达到较好的模拟结果。由于此前我们在西班牙 Teba 河流域模拟研究中, 已进行了敏感性分析, 并确定了各种地理因素对产水量、产沙量、最大洪峰流量、蒸发蒸腾、土壤水分和生物量影响的方向和大小^[2,3], 所以就直接采用了该研究成果来指导本研究的模拟实验与参数调整, 即先改变影响最大的参数, 再改变影响次大的参数, 等等, 从而减少了实验次数, 缩短了实验时间。

下面只列出一些最后的主要模拟结果, 重点是产水量和产沙量。二者均是流域出口处的总输出量(注明亚区值者除外), 分别折算为流域内水层厚度和流域内单位面积重量。

表 1 中的地表径流、地下径流、产水量、产沙量、渗漏水、传输损失和蒸发蒸腾等, 是每日模拟所得值的和的累加。土壤水分(全剖面)则是每日模拟结果

* 国家自然科学基金项目(49571035)资助

† 通讯作者

作者简介: 曾志远(1940~), 男, 湖北郧县人, 研究员, 主要从事遥感图像处理 and 过程计算机模拟

收稿日期: 2005-12-10; 收到修改稿日期: 2005-12-30

逐日变化到最后一日结束时的模拟值。校正雨量是每日雨量的和的累加, 是根据流域内三个雨量站的每日降雨值, 用我们自己的雨量- 高程模型进行雨量校正, 又经各亚区面积加权平均算得的。

表 2 中的雨量、雨暴标准差、地表径流、地下径流、产沙量、潜热单位、总生物量、各土层和全剖面土壤水分等, 是分亚区输出的。

表 1 按年和月输出的湫水河流域的某些重要模拟结果
Table 1 Simulated outputs from the Lianshui basin on a monthly or yearly basis

年份	月份	校正雨量 Corrected rainfall (mm)	地表径流 Surface runoff (mm)	地下径流 Subsurface runoff (mm)	产水量 Water yield (mm)	渗漏水 Percolate (mm)	传输损失 Trans losses (mm)	蒸发蒸腾 ET (mm)	产沙量 Sediment yield (t hm ⁻²)	土壤水分 (全剖面) Total soil water (mm)
Year	Month									
1993	1	93.87	26.67	0.03	10.70	16.54	11.42	36.15	0.13	31.82
	2	132.52	63.65	0.12	39.31	22.58	24.39	36.71	0.29	62.94
	3	227.93	137.79	1.95	94.63	55.37	45.38	56.88	0.96	74.52
	4	170.14	94.48	3.27	56.91	41.69	41.03	75.17	0.27	70.47
	5	357.76	234.07	4.18	164.63	80.76	74.06	104.12	0.99	73.75
	6	427.69	316.03	5.80	225.71	82.11	96.57	119.90	0.74	67.99
	7	103.67	42.52	5.92	29.98	17.14	18.26	89.52	0.06	39.90
	8	102.12	47.37	4.59	37.24	12.46	14.46	60.63	0.20	35.92
	9	99.28	36.82	3.48	27.97	15.72	12.10	64.84	0.14	34.76
	10	162.85	102.46	3.05	73.67	24.18	31.87	38.60	0.10	60.60
	11	82.08	41.02	2.97	30.22	12.89	13.66	39.55	0.07	62.69
	12	8.95	0.70	2.42	2.39	2.49	0.70	21.45	0.00	47.69
		总量 Sum	1 968.86	1 140.59	37.81	794.36	383.93	383.91	743.52	3.95
1994	1	18.36	4.10	1.87	3.18	4.05	2.64	12.72	0.00	47.82
	2	300.48	202.20	2.86	145.59	65.23	59.70	42.03	0.30	80.93
	3	304.35	212.20	6.06	162.64	72.36	55.84	56.08	0.42	85.38
	4	223.33	148.26	7.76	114.43	56.20	41.95	65.71	0.32	70.02
	5	419.81	325.98	8.99	269.95	64.16	64.60	80.96	1.21	75.26
	6	575.13	463.87	10.21	371.63	104.64	103.55	105.53	0.80	52.76
	7	275.46	182.58	11.76	152.18	32.21	42.41	117.75	0.37	34.98
	8	180.38	89.57	9.45	71.76	21.44	27.16	102.51	0.50	28.16
	9	58.35	11.51	7.18	10.22	9.44	8.22	57.19	0.02	21.94
	10	80.24	35.35	5.94	27.82	12.37	13.40	32.85	0.06	34.09
	11	4.92	1.08	4.49	4.45	3.29	1.06	9.73	0.00	35.97
	12	229.58	150.96	5.40	101.18	52.73	55.16	48.46	0.09	67.66
		总量 Sum	2 690.37	1 827.65	81.98	1 435.04	498.14	475.70	731.54	4.09
1995	1	121.79	75.25	5.11	56.82	27.91	23.60	31.61	0.08	74.47
	2	240.82	154.48	6.13	98.12	78.81	62.93	43.56	0.16	74.45
	3	188.25	91.81	11.48	51.68	69.70	51.96	57.49	0.09	79.07
	4	342.24	243.14	11.77	196.84	67.90	58.08	76.75	0.95	79.42
	5	228.95	163.99	11.61	137.35	43.96	38.60	69.36	0.35	63.03
	6	595.18	474.17	10.64	382.94	88.42	102.11	113.07	1.19	71.58
	7	250.27	167.89	10.28	144.43	27.33	33.17	95.65	0.67	61.98
	8	206.61	123.06	8.66	100.09	27.83	32.38	114.83	0.40	31.28
	9	119.37	71.32	6.90	65.63	14.25	12.32	53.95	0.26	27.93
	10	91.90	47.25	5.72	36.36	11.64	16.58	39.45	0.03	37.46
	11	28.01	3.52	4.31	4.31	5.84	3.46	21.07	0.00	38.49
	12	19.57	4.37	3.45	4.29	3.74	3.30	14.95	0.00	38.31
		总量 Sum	2 432.97	1 620.26	96.05	1 278.86	467.32	438.48	731.74	4.19

表2 按亚区输出的澉水流域某些模拟结果(1993~1995年平均)

Table 2 Simulated mean outputs from 6 subareas of the Lianshui basin (means of year 1993~1995)

亚区 Subarea	雨暴标准差		地表径流 Surface runoff (mm)	地下径流 Subsurface runoff (mm)	产沙量 Sediment yield (t hm ⁻²)	潜热单位 Potential heat unit (J)	总生物量 Total biomass (kg hm ⁻²)	土壤水	土壤水	土壤水	土壤水	土壤水
	雨量 Rainfall (mm)	Standard deviation of storms (mm)						(全剖面) Total soil water (mm)	层1 Soil water layer 1 (mm)	层2 Soil water layer 2 (mm)	层3 Soil water layer 3 (mm)	层4 Soil water layer 4 (mm)
1	2 366	20.82	1 507	212.3	1.3	12 853	20 558	38.1	0.0	0.0	2.1	36.0
2	2 091	20.48	1 406	92.9	2.6	13 498	11 835	35.4	0.0	0.0	1.0	34.4
3	2 240	21.94	1 711	68.1	55.6	13 498	88 445	56.7	0.0	0.0	0.0	56.7
4	2 535	22.30	1 962	30.2	86.1	13 498	6 726	71.7	0.0	0.0	71.7	—
5	2 347	21.21	1 356	67.9	2.4	10 703	14 079	25.2	0.0	0.0	0.0	25.2
6	2 348	21.21	1 331	87.8	2.1	12 887	18 385	17.6	0.0	0.0	0.0	17.6
全区 Basin	2 364	21.33	1 530	75.8	25.1	13 048	13 162	38.3	—	—	—	—

2 结果与分析

2.1 澉水流域自然过程的动态变化分析

由表1可以清楚地看到流域产水产沙等自然地理过程的各项结果,从1993年1月1日到1995年12月31日,共36个月的逐月变化。

雨量1月份数值较低。从2月起总趋势是逐渐升高,到6月份达到最大值。7月份起大幅度下降。以后总趋势是逐渐降低,到11或12月达到最低值。各年大抵如此。

地表径流的月变化大体上追随降雨的变化。从年初开始逐渐升高,也是在6月达最高值。此后渐次下降,也是到11月或12月达到最低值。

地下径流的月变化也是春夏高秋冬低,但升降较平缓,秋冬季节的数值一般仍不是很低。地下径流与地表径流和降雨相比,有一定滞后现象。地下径流量3年平均只有地表径流量的4.7%。但在地表径流量最小的月份,地下径流量却都超过地表径流量。

地表径流的年变化也大体上追随降雨的年变化。1993年较低,1994年很高,1995年又略低。地下径流的年变化不像降雨和地表径流,而是从1993年到1994年到1995年渐次升高。

产水量主要反映并追随地表径流量的时间变化,但它也受到地下径流和传输损失变化的轻度影响。渗漏水量和传输损失量量值相近;但量值并不低,约占地表径流的29%左右。

蒸发蒸腾6、7、8或5、6、7等3个月最高,11、12、1等3个月最低,但有例外;因为它受到温度和降雨的双重影响。

产沙量一般以3、4、5、6、7、8等6个月较多,9、10、11、12、1、2等6个月较小。后3个月几乎接近于0,河水为清水。但1994年12月降雨大,泥沙量又升高。泥沙量又以多雨年多,少雨年少。

土壤水分月变化和年变化都较和缓。它好像是径流量或产水量的缓冲器。其高值多半在2、3、4、5、6月,低值多在7、8、9、10、11月,但高低值的差距远较降雨和地表径流小。

这些模拟值第一次提供了流域这些重要量值及其随时间变化的全貌。流域模拟在实际上实现了流域各自然过程准连续变化的动态监测,这是很有意义的。

2.2 澉水流域产水量产沙量总生物量和土壤含水量的空间分布

由表2可知,地表径流较小的是亚区5和亚区6。那里尽管坡度较大,但植被较好。地表径流较大的是亚区3和亚区4。那里坡度比亚区5、亚区6小些,但植被破坏严重。

地下径流则不同,最大的是亚区1,量值是其他各亚区的2~7倍。因这里是河谷低平区,地势最低、坡度最小,且多为稻田;水分容易滞留和下渗。其余亚区中以亚区4(古龙岗亚区)地下径流最小。这与土壤和母质有关。因古龙岗地区土壤是白沙土,土壤层只有3层,下部缺乏粘性大一些的保水层。而其他各亚区土壤层均有4层,且有粘性稍大

的保水层^[1]。流域内的产沙量(间接表明土壤侵蚀量)最多的是第 4 和第 3 亚区,即古龙岗亚区和樟木亚区。说明这些地方土壤侵蚀更严重些,治理时应给以更多的注意。

流域内单位面积上的生物产量,亚区 1(河谷平原区)最高。因为这里是主要的农业区,且以高产作物水稻的种植占绝对优势。然后依次为亚区 6、5、2、3、4,即山区、半山区、莲塘盆地、樟木盆地和古龙岗盆地。这也大体是植被由好到差、侵蚀由弱到强的变化方向。

潜热单位(单位质量物体在温度不变时从一个相变到另一个相所吸收或放出的热量)针对植物和作物计算,它与温度有关。海拔低温度高,故流域的 3 个盆地(亚区 2、3、4)潜热单位最大,半山区(亚区 5)潜热单位小。潜热单位又与植物的种类和多年生或一年生有关。基温(Base temperature)大的作物,潜热单位值小。因此,以生长基温大的水稻为主的河谷低平区(亚区 1)的潜热单位,小于海拔高些的 3 个盆地,以生长基温小的多年生树木为主的山区(亚区 6)的潜热单位,高于平均海拔低些的半山区。潜热单位直接影响生物量的积累。

流域内土壤含水量系模拟结束时的数值。含水量最大的层都在底层,表层(主指第 2 层,因第 1 层模型规定厚度只 10 mm)土壤水很少,次表层有少量水分。全剖面含水总量以亚区 4 和 3 较大(底层保水),亚区 6 和 5 较少(下渗多)。

表 2 中各项量值并无实测值。正是这些模拟值才第一次提供了各项量值的空间分布情况。

模拟还有其他结果。如流域平均洪峰流量为 $272.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 标准差为 $396.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 最大洪峰为 $2079 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 洪峰次数年均 123 次;流域年均降雪 3.53 mm, 年均融雪 3.17 mm 等。

2.3 产水量和产沙量的年模拟值、月模拟值及模拟精度分析

2.3.1 年径流量模拟结果及其精度分析 表 3 是湫水河流域年径流量(除掉传输损失后的地表径流量与地下径流量之和,即产水量^[4])的模拟值、实测值和模拟误差与精度估计。

由表 3 可以看到,年径流量的模拟值与实测值十分相近。3 年的模拟误差分别低到 0.02%、0.25% 和 4.76%,即模拟精度分别高达 99.98%、99.75% 和 95.24%,平均为 98.32%。

表 3 湫水河流域年径流量的模拟值及其与实测值的比较

Table 3 Comparison between the simulated and measured values of yearly water yield in the Liarshui basin

模拟年份 Year	模拟值 Simulated (mm)	实测值 Measured (mm)	绝对误差 Absolute error (mm)	相对误差 Relative error (%)	精度 Accuracy (%)
1993	794.36	794.18	0.18	0.02	99.98
1994	1435.04	1438.65	-3.61	0.25	99.75
1995	1278.86	1342.74	-63.88	4.76	95.24

从理论角度来说,在如此大的流域(579.3 km^2)中,年径流量模拟达到如此高的精度,说明径流这一地理过程年际监测的高度定量化是可以实现的。

与 SWRRB 模型设计者美国发表的资料相比,我们的模拟精度要高得多。他们在美国小瓦西达河(阿克拉荷马州的 Chickasha 地区)做的 3 年模拟的年径流量模拟精度分别只有 94.00%、56.20% 和 0.00% (将相对误差等于或超过 100% 的相应精度值均记为 0.00%)。3 年平均的年模拟误差为 50.07%,精度为 49.93%^[4]。

小瓦西达河和湫水河流域面积相近,分别为

538.2 km^2 和 579.3 km^2 ; 二者的模拟时间均为 3 年;二者均使用了每日降雨数据和每日最高与最低气温数据;故上述比较和结论是适宜的 and 可信的。我们的模拟达到较高精度是因为:(1)将亚区划细(小瓦西达只分 3 个亚区);(2)比较精心而周到地准备和估计了输入数据;(3)依据在西班牙的研究,根据各输入参数对各输出参数影响大小的顺序^[2,3],较充分地调整了输入参数和进行了较多的实验。

2.3.2 月径流量模拟结果及其精度分析 表 4 是湫水河流域月径流量的模拟值、实测值、模拟误差与精度的估计。由表可知,其月径流模拟也达到了较高的精度;有 9 个月精度达 80% 以上;6 个月精

度达 90% 以上; 4 个月精度达 97% 以上。精度最低的 3 个月也达 50% ~ 60% 以上。12 个月总计月平均精度为 83.86%。这也远高于模型设计者所提供的小瓦西达河流域月模拟精度。后者精度高于

90% 者 1 个月也没有; 高于 80% 者只有 1 个月。低于 80% 的有 11 个月, 低于 60% 的有 9 个月, 等于 0.00% 的有 4 个月。12 个月总计的月平均精度为 30.66%^[4]。我们精度高的原因同上节所述。

表 4 澍水河流域三年平均的月径流量模拟值及其与实测值的比较

Table 4 Comparison between the simulated and measured values of 3 year averaged monthly water yield in the Lianshui basin

月份 Month	模拟值 Simulated (mm)	实测值 Measured (mm)	绝对误差 Absolute error (mm)	相对误差 Relative error (%)	精度 Accuracy (%)
1	23.90	29.45	- 5.55	18.84	81.16
2	94.34	65.79	28.55	43.40	56.60
3	102.98	100.67	2.31	2.29	97.71
4	122.73	125.83	- 3.10	2.46	97.54
5	190.65	164.14	26.51	16.15	83.85
6	326.76	324.69	2.07	0.64	99.36
7	108.87	124.10	- 15.23	12.27	87.73
8	69.69	112.44	- 42.75	38.02	61.98
9	34.61	37.18	- 2.57	6.91	93.09
10	45.95	45.40	0.55	1.21	98.79
11	12.99	23.70	- 10.71	45.19	54.81
12	35.95	38.48	- 2.53	6.57	93.43

2.3.3 产沙量的年模拟和月模拟结果及其精度分析 表5和表6分别是澍水河流域产沙量(泥沙量)的年和月模拟值与实测值的比较。由表5可见, 1994年和1995年泥沙年模拟值与实测值接近, 精度分别为 83.83% 和 93.83%。两年平均为 88.83%。第一年(1993)模拟精度很低。模型设计者已经说明, 模拟有一个热身(warm up)或平稳(equilibration)过程, 初始年通常误差较大可不进入统计^[5]。这一点对产沙量特别明显。因此我们的产沙量模拟均值未计入 1993 年。由表 6 可见, 泥沙模拟的两年月平均精度, 有 7 个月达 82% ~ 100%, 3 个月达 58% ~

66%, 2 个月精度为 0%。12 个月的平均精度为 68.80%(热身效应在产水量模拟中不甚明显, 故产水量也统计了 1993 年)。

泥沙模拟精度较低的原因之一可能是低洼地对泥沙的截留(沉积)。《兴国县土壤》载明澍水河流域中有排涝防渍区⁽¹⁾, 这说明流域中低洼地是存在的。低洼地问题也是泥沙模拟和土壤侵蚀定量化的世界性难题。尽管如此, 我们的泥沙模拟精度仍高于美国小瓦西达河流域模拟。同样不计第一年, 后者 2 年平均的年模拟精度为 85.17%, 12 个月平均的月模拟精度为 28.93%^[4]。

表 5 澍水河流域年产沙量的模拟值及其与实测值的比较

Table 5 Comparison between the yearly simulated and measured values of sediment yield in the Lianshui basin

模拟年份 Year	模拟值 Simulated (t hm ⁻²)	实测值 Measured (t hm ⁻²)	绝对误差 Absolute error (t hm ⁻²)	相对误差 Relative error (%)	精度 Accuracy (%)
1993	3.95	2.02	1.93	95.68	4.32
1994	4.09	4.88	- 0.79	16.17	83.83
1995	4.19	4.47	- 0.28	6.17	93.83

表 6 湫水河流域月产沙量的模拟值及其与实测值的比较

Table 6 Comparison between the simulated and measured values of monthly sediment yield in the Lianshui basin

月份 Month	模拟值 Simulated ($t\text{ hm}^{-2}$)	实测值 Measured($t\text{ hm}^{-2}$)	绝对误差 Absolute error ($t\text{ hm}^{-2}$)	相对误差 Relative error (%)	精度 Accuracy (%)
1	0.04	0.03	0.01	33.33	66.67
2	0.23	0.20	0.03	15.00	85.00
3	0.26	0.23	0.03	13.00	87.00
4	0.64	0.63	0.01	1.59	98.41
5	0.78	0.95	- 0.17	17.89	82.11
6	1.00	1.72	- 0.72	41.86	58.14
7	0.52	0.26	0.26	100.00	0.00
8	0.45	0.51	- 0.06	11.76	88.24
9	0.14	0.10	0.04	40.00	60.00
10	0.05	0.02	0.03	150.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
12	0.05	0.05	0.00	0.00	100.00

2.3.4 模拟精度与模拟年限的关系 我们的实验表明,模拟结果与模拟年限有关。因为模拟参数调整实验要照顾到整个模拟年限的模拟精度,所以一般模拟年限越短精度越高,模拟年限越长精度越低。但是模拟年限达到一定长度后,精度就较稳定

了。我们对本流域分别作了 1~ 10 年的模拟实验,表明一般达到 7~ 8 年后,模拟结果就较稳定。下面提供 1992~ 1999 年产水量和产沙量的 8 年模拟结果(表 7、表 8、表 9),以资说明。

表 7 湫水河流域 8 年(1992~ 1999)产水量和产沙量的年模拟值及其与实测值的比较

Table 7 Simulated and measured values of water yield and sediment yield over 8 years (1992~ 1999) in the Lianshui basin

年份 Year	产水量 Water yield					产沙量 Sediment yield				
	模拟值 Simulated (mm)	实测值 Measured (mm)	绝对误差 Absolute error (mm)	相对误差 Relative error (%)	精度 Accuracy (%)	模拟值 Simulated ($t\text{ hm}^{-2}$)	实测值 Measured ($t\text{ hm}^{-2}$)	绝对误差 Absolute error ($t\text{ hm}^{-2}$)	相对误差 Relative error (%)	精度 Accuracy (%)
1992	1 580.50	1 618.70	- 38.20	2.36	97.64	4.58	7.10	- 2.52	35.55	64.45
1993	819.95	794.18	25.77	3.25	96.75	1.95	2.02	- 0.07	3.38	96.62
1994	1 391.33	1 438.65	- 47.32	3.29	96.71	3.67	4.88	- 1.21	24.80	75.20
1995	1 229.39	1 342.74	- 113.35	8.44	91.56	3.54	4.47	- 0.93	20.81	79.19
1996	1 320.53	1 031.22	289.31	28.06	71.94	3.43	3.02	0.41	13.58	86.42
1997	1 678.55	1 812.81	- 134.26	7.41	92.59	4.94	4.86	0.08	1.65	98.35
1998	1 554.15	1 727.17	- 173.02	10.02	89.98	4.98	8.16	- 3.18	38.97	61.03
1999	1 292.29	1 123.29	169.00	15.05	84.95	4.24	4.19	0.05	1.19	98.81
平均 Mean	1 358.34	1 361.10	±123.78	9.74	90.27	3.92	4.33	±1.06	17.49	82.51

表 8 澍水流域 8 年(1992~1999)产水量模拟的月平均值及其与实测值的比较

Table 8 Simulated and measured monthly mean water yield over 8 years (1992~1999) in the Lianshui basin

月份 Month	模拟值 Simulated (mm)	实测值 Measured (mm)	绝对误差 Absolute error (mm)	相对误差 Relative error (%)	精度 Accuracy (%)
1	42.97	42.21	0.76	1.80	98.20
2	81.18	73.40	7.78	10.60	89.40
3	168.84	153.79	5.05	9.79	90.21
4	149.69	149.31	0.38	0.25	99.75
5	197.24	170.35	26.89	15.79	84.21
6	265.98	264.22	1.76	0.67	99.33
7	162.73	167.84	-5.11	3.04	96.96
8	161.44	157.28	4.16	2.64	97.36
9	52.62	70.56	-17.94	25.43	74.57
10	29.97	47.12	-17.15	36.40	63.60
11	19.16	29.70	-10.54	35.49	64.51
12	26.52	34.68	-8.16	23.53	74.47

表 9 澍水流域 8 年(1992~1999)产沙量模拟的月平均值及其与实测值的比较

Table 9 Simulated and measured monthly mean sediment yield over 8 years (1992~1999) in the Lianshui basin

月份 Month	模拟值 Simulated($t \cdot hm^{-2}$)	实测值 Measured($t \cdot hm^{-2}$)	绝对误差 Absolute error($t \cdot hm^{-2}$)	相对误差 Relative error (%)	精度 Accuracy (%)
1	0.10	0.04	0.06	150.00	0.00
2	0.13	0.12	0.01	8.33	91.67
3	0.37	0.49	-0.12	24.49	75.51
4	0.45	0.46	-0.01	2.17	97.83
5	0.68	0.89	-0.21	23.60	76.40
6	0.74	1.31	-0.57	43.51	56.49
7	0.46	0.52	-0.06	11.54	88.46
8	0.70	0.84	-0.14	16.67	83.33
9	0.17	0.10	0.03	70.00	30.00
10	0.04	0.03	0.01	33.33	66.67
11	0.04	0.01	0.03	300.00	0.00
12	0.03	0.02	0.01	50.00	50.00

由表 7 来看, 较长年份模拟的平均年模拟精度, 产水量可达 90.27%, 产沙量可达 82.51%。由表 8 和表 9 可以算得 8 年的平均月模拟精度, 产水量为 86.05%, 产沙量为 59.70%。

从实用角度来说, 这样的径流年模拟精度可用于径流中期和长期年际模拟、预测和监测, 或用于径流观测不全的流域年际资料的插补或外延, 或用于无观测资料的流域的多年径流估测, 这些都是很有意义的。但径流月模拟和泥沙模拟, 精度还有待

提高。

3 结论与展望

使用数学模型, 并用各种方法精心估计和确定各种地理因素数据, 对流域进行计算机模拟和参数调整试验, 能够得到较好精度的关于该流域产水量和产沙量及土壤水分、生物量、潜热、洪峰、降雪、融雪等多种自然过程的多年模拟结果; 由此可以知道

关于该流域产水、产沙等各种自然过程时间与空间变化的全貌与规律。这对于监测地区性环境变化和水土资源管理, 都是很有意义的。

由于对任何国家和地区来说, 能被实测的流域和项目都是非常有限的, 要得到一个地区所需流域的准连续时间的产水、产沙和其他有关地理数据, 通过数学建模和计算机模拟将是一个有效而可行的途径。对于实测数据极少或完全没有的流域来说, 也可以参照相邻或类似地区的有限数据, 并同时采用遥感和 GIS 技术, 或辅以本流域的有限实测来进行。

模拟成功的关键在于: (1) 根据流域内地理条件的分异将流域分为尽可能多的亚区, 分别准备数据; (2) 采取各种办法估算和估计流域的各种地理参数; (3) 进行反复的模拟参数调整实验, 使之与有限的实测数据接近以达到最佳模拟; (4) 根据影响因素从大到小的顺序(自己或别人以往确定的)依次调整参数, 可大大减少实验次数和最快达到最好结果。

由于 SWWRB 模型是一个包括众多输入因素和输出项目的水文-地理模型或地理模型, 而不是单纯的水文模型; 由于它可进行广大空间而不仅是小流域的模拟; 由于它在发展过程中还包括了农药和化学物质的模拟^[6, 7]; 由于其改进版本 SWAT 包括了更多的地理因素、过程和数学方程, 并可与地理信息系统集成^[5]; 由于自然地理过程量化以流域为基本地域单位进行较有效^[8, 9]; 由于我们过去先在西班牙 Teba 河流域, 现在又在中国江西湫水河流域作了水径流(产水量等)和固体径流(产沙量等)的模拟^[2, 3, 10], 又做了化学径流的模拟^[11, 12]; 我们觉得通过以流域为基本地域单位, 并使用数学模型进行自然过程的计算机模拟, 从而实现自然地理过程的高度量化, 是可能的和有良好前景的。

现在, 国内外对地理过程的数学建模和计算机模拟的认识正在加深, 对遥感、GIS 技术和建模、模拟技术结合的必要性的认识也正在加深, 热度也在迅速上升^[13~17]。因此, 自然地理过程的高度量化在遥感、GIS、GPS、建模、模拟和数字地球等现代技术支撑之下, 必能以更高的速度发展, 并达到一个新的高度。

参考文献

[1] 曾志远, 潘贤章, 李硕. 湫水流域产水产沙等自然过程的计算机模拟 I. 数学模型体与参数输入研究. 土壤学报, 2006, 43(3): 362~368. Zeng Z Y, Pan X Z, Li S. Computer simulation of water yield, sediment yield and other natural processes in Lianshui

basin I. Mathematic model system and parameters' input (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 362~368

[2] Zeng Z Y, Meijerink A M J. Water yield and sediment yield simulation for Teba catchment in Spain using SWRRB model: I. Model input and simulation experiment. Pedosphere, 2002, 12(1): 41~48

[3] Zeng Z Y, Meijerink A M J. Water yield and sediment yield simulation for Teba catchment in Spain using SWRRB model: II. Simulation results. Pedosphere, 2002, 12(1): 49~58

[4] Arnold J G, Williams J R, Nicks A D, et al. A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management. Texas A & M University Press, 1990. 1~142, Appendix I ~ X

[5] Neitsch S L, Arnold J G, Williams J R. Soil and Water Assessment Tool. User's Manual 99. 2. 808. East Blackland Rd, Temple, Texas 76702: USDA Agriculture Research Service and Grassland Soil and Water Research Laboratory. 1999. Chapter 3, 45~68

[6] Williams J R, Nicks A D, Arnold J G. Simulator for Water Resources in Rural Basins. J. Hydraulic Eng., 1985, ASCE, III(6): 970~986

[7] Knisel W G. ed. CREAMS, A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, USDA Conserv. Res. Rept. No. 26, 1980. 643~644

[8] 曾志远, 潘贤章. 利用遥感和地理信息系统进行流域环境模拟探讨. 见: 遥感新发展与发展战略. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. 200~204. Zeng Z Y, Pan X Z. Inquiring into basin environment simulation using remotesensing and GIS (In Chinese). In: New Progress and Development Strategy of Remote Sensing. Beijing: China Science & Technology Press, 1996. 200~204

[9] 黄秉维. 地理学综合工作与跨学科研究. 见: 陆地系统科学与地理综合研究. 北京: 科学出版社, 1999. 1~26. Huang B W. Synthetic and interdisciplinary studies in geography (In Chinese). In: Terrestrial System Science and Geographical Synthetic Study. Beijing: Science Press, 1999. 1~26

[10] 李硕, 曾志远, 赵其国, 等. 遥感、GIS 辅助下流域空间离散化方法研究. 土壤学报, 2004, 41(2): 183~189. Li S, Zeng Z Y, Zhao Q G, et al. Study on spatial discretization method of a basin by the aid of remote sensing and GIS (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 183~189

[11] 张运生, 曾志远, 李硕. GIS 辅助下的江西湫水河流域径流的化学组成计算机模拟研究. 土壤学报, 2005, 42(4): 559~569. Zhang Y S, Zeng Z Y, Li S. GIS aided computer simulation of chemical composition of runoff in Lianshui basin, Jiangxi Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 559~569

[12] 李硕, 孙波, 曾志远, 等. 遥感、GIS 辅助下流域养分迁移过程计算机模拟. 应用生态学报, 2004, 15(2): 278~282. Li S, Sun B, Zeng Z Y, et al. Computer simulation of nutrients transport in a basin by the aid of remote sensing and GIS (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 278~282

[13] Dobson J E. Commentary: A conceptual framework for integrating remote sensing, GIS and geography. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1993, 59(10): 1491~1496

[14] Star J L, et al. Improved integration of remote sensing and geographic information systems: A background to NCGIA initiative 12. Phor

- togrammetric Engineering & Remote Sensing, 1991, 57(6): 643~ 645
- [15] Goodchild M F, *et al.* Environmental Modeling with Geographic Information Systems. New York: Oxford University Press, 1993
- [16] 承继成, 李琦, 易善桢, 编著. 国家空间信息基础设施与数字地球. 北京: 清华大学出版社, 1999. 192~ 195. Cheng J C, Li Q, Yi S Z. eds. National Spatial Information Infrastructure and Digital Earth (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 192~ 195
- [17] 中国地理学会数量地理专业委员会. 面向 21 世纪的数量地理学. 世纪之交的中国地理学. 北京: 人民教育出版社, 1999. 190~ 201. Mathematical Commission of the Chinese Society of Geography. Mathematical geography facing to the 21th century. Geography in China at the Cross Point of the 21~ 22 Centuries (In Chinese). Beijing: People's Education Press, 1999. 190~ 201

COMPUTER SIMULATION OF WATER YIELD, SEDIMENT YIELD AND OTHER NATURAL PROCESSES IN LIANSHUI BASIN II. SIMULATION RESULTS AND THEIR ANALYSIS

Zeng Zhiyuan^{1†} Pan Xianzhang² Li Shuo¹

(1 College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

(2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Simulation results of water yield, sediment yield and other natural processes in the Lianshui basin, China were presented for analysis of their tempo-spatial variation and simulation accuracy. Simulation needs a warm up' stage at the beginning, especially for simulation of sediment yield. Simulation accuracy decreases with the number of years in simulation. For simulation of water yield, the mean accuracy over 3 years is 98.32%, and over 8 years it is 90.27%, while for simulation of sediment yield, the mean accuracy over 2 years is 88.83%, and over 8 years it is 82.51%, which suggests that the method can be used to medium or long-term dynamic monitoring of water and sediment yields in a basin. As for monthly simulation accuracy, the mean over 3 years is 83.84% and the mean over 8 years is 86.05% for water yield, and the mean over 2 years is 68.80% and the mean over 8 years is 59.70% for sediment yield. Simulation results of the method can also be applied for natural resources management in a basin.

Key words Dynamic monitoring; Simulation accuracy; Water resource; Soil erosion; Geographic process quantification