

重庆三峡库区非点源污染来源分析及负荷计算^{*}

曹彦龙^{1,3}, 李崇明^{2,3}, 郭劲松², 方芳²

(1. 中国市政工程西南设计研究院, 四川成都 610081; 2. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 重庆市环境科学研究院, 重庆 400020)

摘要:通过 2000 年统计资料,分析了重庆三峡库区农村生活污水、固体废弃物、化肥流失、农药流失、畜禽养殖、水土流失、城市径流等污染源对非点源污染物 COD、NH₃-N、TN、TP 的贡献。运用 RUSLE 模拟计算颗粒态污染负荷并结合溶解态污染负荷,估算入库非点源污染总负荷。得出库区颗粒态 N 负荷(占 TN 的 50.1%)与溶解态 N 负荷(占 TN 的 49.9%)相当;颗粒态 P 负荷(占 TP 的 58.0%)略大于溶解态 P 负荷(占 TP 的 42.0%)。该方法给湖泊、水库等水体底质再悬浮与释放溶解态 N、P 的迁移研究提供了计算颗粒态污染负荷和溶解态污染负荷的简洁方法。

关键词:三峡库区; 非点源; RUSLE; 颗粒态

中图分类号:X501 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7329(2007)04-0001-05

Pollutant Source Analysis and Pollution Loads Estimation from Non-point Source in Chongqing Three Gorges Reservoir Region

CAO Yan-long^{1,3}, LI Chong-ming^{2,3}, Guo Jing-song², Fang Fang²

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Chongqing Institute of Environmental Science, Chongqing 400020, China)

Abstract: According to the statistics of Chongqing Three Gorges Reservoir Region in 2000, this paper analyzes the affecting factors, including rural domestic waste, solid waste, fertilizer run off, pesticide run off, poultry and livestock farm, soil erosion, surface flow of the city, and their contribution to COD, NH₃-N, TN, TP of non-point source pollutant. Furthermore, according to the pollution loads of dissolved form and pollution loads of particulate form by using RUSLE simulation and calculation, the total pollution loads of non-point source in Chongqing Three Gorges Reservoir Region are estimated. It concluded that the particulate form N loadings (50.1% of TN) is almost equal to dissolved form N loadings (49.9% of TN); but the particulate form P loadings (58.0% of the total phosphorus) is more than dissolved form P loadings (42.0% of the total phosphorus). It is a simple and direct method of estimating non-point source pollution loadings, which can be applied in the nutriment migration of the water body's bottom sludge, such as lake and reservoir etc.

Keywords: Three Gorges Reservoir Region; non-point source; RUSLE; particulate form

随着三峡工程的建设,库区水位上涨,库容增大,水流循环周期长达 77 d,水体自净能力下降,库区水质污染问题将越来越严重。国内外研究表明,湖泊、水库、水源等的非点源污染占了水质总污染的 50% 以上,非点源污染物含 N、P 较高,而 N、P 的富集恰是引起湖泊、水库等水体富营养化的主要原因^[1],因此治理

三峡库区非点源污染对改善库区水质起着重要的作用,必须引起高度重视。

国内外非点源污染负荷的估算常用方法有两种:统计方法、基于 GIS 的模型(AnnAGNPS、CREAMS、ANSWERS 等)模拟^[5]。统计方法工作量大,模型模拟大部分要建立在数字高程模型(DEM)之上,极大地

* 收稿日期:2007-02-15

基金项目:中国工程院《三峡库区及其上游水污染防治策略》咨询项目

作者简介:曹彦龙(1980-),男,甘肃定西人,硕士,主要从事给排水工程和水环境保护研究。

限制了它们的应用。土壤侵蚀量的估算在国内研究较成熟,20 世纪 80 年代郭生炼就对三峡库区水土流失进行了研究:土壤侵蚀模数约为 $3\,000\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$,平均入江泥沙量约为 $895\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 。本文借助 2000 年重庆三峡库区 40 个区、县各污染源污染物入河污染负荷分析了各污染源对污染物 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 的贡献;运用 RUSLE 模拟计算颗粒态污染负荷,结合溶解态污染负荷,估算入库非点源污染总负荷。

1 研究材料

研究范围覆盖重庆三峡库区 40 个区、县(市):万州区、黔江区、涪陵区、渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、万盛区、双桥区、渝北区、巴南区、长寿区、綦江县、潼南县、铜梁县、大足县、荣昌县、璧山县、梁平县、城口县、丰都县、垫江县、武隆县、忠县、开县、云阳县、奉节县、巫山县、巫溪县、石柱县、秀山县、酉阳县、彭水县、江津市、合川市、永川市、南川市。

研究内容:农村生活污水、农村固体废弃物、农药流失、化肥流失、水土流失、禽畜养殖、城市地表径流 7 个污染源中进入水体的污染负荷(主要包括:COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 入河污染负荷)。

2 重庆三峡库区非点源污染物来源分析

2.1 污染源的分析

纵观国内外,非点源污染主要起源于水土流失、农药与化肥的施用、农村禽畜粪便与垃圾、农田污水灌溉,城镇地表径流、林区地表径流、废弃的矿山、大气的沉降以及产生污染的生产活动。

重庆三峡库区非点源污染源主要以农村生活污水、农村固体废弃物、农药流失、化肥流失、水土流失、禽畜养殖、城市地表径流等为主。农村生活污水来自农村居民生活污水散排流入当地水体的那部分;农村固体废弃物主要来自农作物秸秆、生活垃圾等的入河污染;农药流失主要为含有机磷和有机氯的农药径流污染;化肥流失为氮肥、磷肥、复合肥等化肥的流失;水土流失是次降雨冲刷地表引起的土壤营养物的流失;禽畜养殖是来自牛、大牲畜(马、驴、骡)、羊、猪和其它禽畜的粪便径流污染;城市地表径流为降雨径流冲刷的城镇地表引起城市垃圾、大气沉降、动植物遗体、落叶等污染物的汇流。

2.2 污染源的贡献分析

根据 2000 年重庆三峡库区 40 个区、县各污染源污染物入河污染负荷,分析各污染源对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 的贡献,具体如下:

COD 负荷的主要贡献源是畜禽养殖和农村生活污水,仅这两大污染源就占了 94.5%(分别占 74.7%、19.8%); $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷的主要贡献源是化肥流失、水土流失和农村生活污水,这三大污染源共占 98.7%(分别占 53.7%、30.3%、14.7%);TN 负荷主要贡献源是化肥流失和水土流失,这两大污染源共占 92.5%(分别为 59.1%、33.4%);TP 负荷主要贡献源是化肥流失、水土流失和禽畜养殖,这三大污染源共占 95.6%(分别占 47.4%、27.4%、20.8%),见图 1。

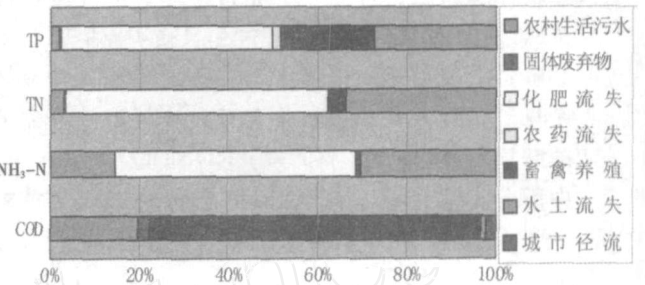


图 1 各污染源对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 的贡献比

3 入库非点源污染负荷估算方法

非点源污染的发生及污染程度与水流循环有密切的联系。非点源污染负荷与土壤质地、地形、耕作措施、降水量、降雨强度、下渗和蓄水特征及其他水文参数有密切的关系。非点源污染的起源和机理虽然很复杂,但可从降雨输入开始到下垫面的响应,再到产污输出,建立概念性或者物理性模型。在地表径流的作用下,降雨能量和雨滴的溅散作用使土壤颗粒发生游离,然后随地表径流流走。在此过程中,一部分溶解性污染物溶于水随流而下,另一部分颗粒态污染物黏附于土壤颗粒或沉积或在水流携带下随流而下。本文采用美国通用土壤侵蚀流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation,即 RUSLE)来计算非点源污染负荷,具体计算过程见图 2。

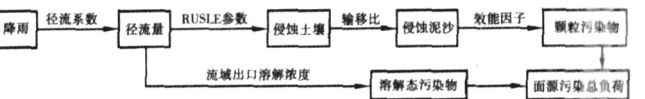


图 2 基于 RUSLE 模型的面源污染负荷计算过程图

3.1 土壤侵蚀的计算

一般情况下,影响山地土壤侵蚀的主要变量有气候、土壤特征、植被、降雨、气温、地势和人类活动。美国农业部农业研究所在美国东部地区 30 个州的径流小区进行了 30 余年的观测,根据经过 40 多年的研究得出的 RUSLE 方程是估算高地侵蚀造成土壤流失最常用的估算式:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

式中: A 为单位面积年平均土壤侵蚀量, $\text{t/hm}^2\cdot\text{a}$; R

为降雨径流侵蚀因子(降雨侵蚀力指标); K 为土壤侵蚀因子, $t/hm^2 \cdot a$; LS 为地形地貌(坡长、坡度)因子; C 为耕作管理(植被覆盖)因子; P 为水土保持因子。

土壤侵蚀量计算式如下:

$$E_g = A \times Q$$

式中: E_g 为流域土壤侵蚀量, t ; Q 为流域面积, hm^2 。

文中计算均按照重庆市 40 个行政区(区、县(市))划分来模拟的。

3.1.1 降雨径流侵蚀因子 R 的确定 R 是降雨和径流因子,即降雨侵蚀指数加上融雪径流和雨水径流因子(当这些径流较明显时)。 R 与降雨量、降雨强度、历时、雨滴的大小以及雨滴下降速度有关,它反映了降雨对土壤的潜在侵蚀能力。在通用土壤流失方程中,我国的周伏健等人通过研究,提出了适合我国南方地区降雨侵蚀力 R 值的简易计算公式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (0.3046 P_i - 0.26398)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力指标 R 值, $J \cdot cm/m^2 \cdot h$; P_i 为月降雨量, mm 。

采用张建国等人在《重庆市降雨侵蚀力(R 值)的时空分布特征》^[4]一文中的统计数据(1975~1985)来计算各区县的 R 值。

3.1.2 土壤侵蚀因子 K 的确定 参数 K 是土壤潜在侵蚀性的量度,反映了土壤的颗粒容易遭受侵蚀程度的一个参数。重庆三峡库区所控制区域的土壤以地表(0~12 cm)有机质含量约为 1.855 %^[3]砂质壤土为主。如果按每个小区内的土壤分布的实际情况来计算 K 值,其工作量太大。在此,根据整个重庆三峡库区土壤所占比例(紫色土占 47.8 %、灰色土占 34.1 %和黄壤土占 16.3 %)^[8]及规范上所列土壤类型,选取质地为细砂质壤土有机质含量为 2 %的 K 值 0.30 作为每个分区计算的通用值。

3.1.3 地形地貌因子 LS 的确定 坡长和坡度的影响分别表示为 L 和 S ,然而往往把它们作为一个独立的地形因子 LS 来估计。当坡长和坡度确定以后 LS 的计算公式如下:

$$LS = (\lambda/72.6)^m (65.4 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065)$$

式中: λ 为坡长, f_t ; θ 为坡角度, $\theta = tg^{-1}(S/100)$; S 为坡度百分比;指数 m 的现行推荐值如下:

$$m = \begin{cases} 0.5 & S \geq 5 \% \\ 0.4 & 3.5 \% < S < 4.5 \% \\ 0.3 & 1 \% \leq S \leq 3 \% \\ 0.2 & S < 1 \% \end{cases}$$

重庆市以山地、丘陵面积占 96.12 %,60 %以上的土地为坡耕地,其中 46 %的坡耕地 > 25 °。要准确的

计算坡长、坡度是很难实现的,故采用典型区域代替分区的坡长和坡度值。将三峡库区划分为两大块:渝中西部丘陵带和渝东中低山区,在等高线图纸上选取每个分区坡长为 $13/f_t$ (约为 4 m) 所对应的 S ,进而得出其坡度分别为 18 °、24 °。库区地形坡度百分比 S 均大于 5 %,选取指数 $m = 0.5$ 。

3.1.4 耕作管理(植被覆盖)因子 C 的确定 耕作管理因子 C 因子,它考虑地表覆盖情况、土壤情况,以及一般管理措施对于侵蚀速度的影响。 C 值的取值范围为 0 到 1 之间。在完全没有植被保护的裸露地面 C 值定为 1;完全被植被覆盖的地面时取 C 为 0。本文根据《重庆市 2005 年度土地利用变化情况分析报告》,将土地划分为四类如表 1。 C 值选取分别按耕地为种植谷类($C = 0.2$)、林地覆盖率为 75 %~100 %的常年牧草地($C = 0.01$),建设用地为没有植物覆盖($C = 1.0$)和其它用地为覆盖率达 80 %杂草地($C = 0.04$)来考虑, C 值与面积百分比之积的和(即 C 值)作为每个区通用值,主城区(包括:渝中区、沙坪坝区、江北区、南岸区、北碚区、九龙坡区、大渡口区)根据其具体植被情况^[7]作了适当调整。

表 1 2005 年重庆市土地分类

地类	耕地	林地	建设用地	其他用地	合计
面积/ km^2	22 661	32 788	5 702	21 251	82 402
比例/%	27.5	39.79	6.92	25.79	100

3.1.5 水土保持因子 P 的确定 管理参数 P 是在农耕地上采用水土保持措施与未经任何保护措施的地块上的比值,反映水土保持措施对土地侵蚀量的影响。不同种类作物的配搭种植,作物不同种植措施等也都反映在 P 值的差别上。其值规定为:在农耕地上采用水土保持措施与未经任何保护措施的地块上的土壤流失量的比值。重庆三峡库区水土保持具体情况难以确定,这里根据有关文献^[5]提供的数据(在坡度分别为:1.1 ~2.0 °、2.0 ~7.0 °、7.0 ~12.0 °、12.0 ~18.0 °、18.0 ~24.0 时,等高耕作、带状耕作和隔坡梯田三种耕作分别对应的 P 值),选坡度 18.0 ~24.0 之间,综合三种耕作方式所占比例确定 P 值,主城区根据其具体耕作情况^[7]作了适当调整。

3.2 泥沙的计算

流域产沙量只是总侵蚀量的一部分,它等于总侵蚀量减去到达参考点之前的沉积量。输移比为输移出给定区域的产沙量与总侵蚀量之比,则侵蚀泥沙为:

$$S_y = D_R \times E_g$$

式中: D_R 为输移比; S_y 为产沙量, t 。

产沙与侵蚀之间存在一定关系,对其迁移率的准确估算还处在初始阶段,现有的模型粗燥且不准确。

产沙量与侵蚀量之间的迁移率受到泥沙重新沉积,植物残余对泥沙的拦截,集水区的地形等影响。目前尚无估计 DR 通用的方程,这里采用相关文献[6]所提供的值:0.30,由此可计算出年产沙量 $7\,981/10^4\text{ t}$ 。以上计算数据详见表 2。

表 2 泥沙负荷计算表

行政区	面积 /km ²	降雨量 /mm	径流量/ 10 ⁸ ·t·a ⁻¹	R 值/ J·cm·m ⁻² ·h ⁻¹	K 值	LS 值	C 值	P 值	A 值/ t·hm ⁻² ·a ⁻¹	土壤侵蚀量 E_g /10 ⁴ ·t·a ⁻¹	泥沙 S_y / 10 ⁴ ·t·a ⁻¹
万州区	3 457	1 417	28.31	400.4	0.30	3.281	0.13	0.58	23.77	1 027.3	308.2
黔江区	2 397	1 386	22.57	390.5	0.30	5.415	0.13	0.58	38.26	1 146.4	343.9
涪陵区	2 946	1 074	15.71	294.4	0.30	3.281	0.13	0.58	17.48	643.7	193.1
渝中区	22	1 021	0.12	277.8	0.30	3.281	0.01	0.15	0.33	0.1	0.0
大渡口区	94	1 041	0.37	283.8	0.30	3.281	0.05	0.35	3.91	4.6	1.4
江北区	214	1 029	1.19	280.3	0.30	3.281	0.05	0.35	3.86	10.3	3.1
沙坪坝区	383	1 014	2.06	275.6	0.30	3.281	0.05	0.35	3.80	18.2	5.5
九龙坡区	443	965	1.73	262.5	0.30	3.281	0.05	0.35	3.62	20.0	6.0
南岸区	279	1 021	1.34	280.0	0.30	3.281	0.13	0.50	14.33	50.0	15.0
北碚区	755	1 035	3.65	283.8	0.30	3.281	0.13	0.58	16.85	159.0	47.7
万盛区	566	1 010	2.81	276.2	0.30	3.281	0.13	0.58	16.40	116.0	34.8
双桥区	37	916	0.14	247.7	0.30	3.281	0.13	0.58	14.71	6.8	2.0
渝北区	1 452	1 138	8.85	315.2	0.30	3.281	0.13	0.50	16.13	292.8	87.8
巴南区	1 830	999	7.86	272.8	0.30	3.281	0.13	0.40	11.17	255.5	76.7
长寿县	1 415	1 302	8.41	364.8	0.30	3.281	0.13	0.58	21.66	383.1	114.9
綦江县	2 182	922	9.79	248.4	0.30	3.281	0.13	0.58	14.75	402.3	120.7
潼南县	1 585	956	4.57	259.6	0.30	3.281	0.13	0.58	15.41	305.4	91.6
铜梁县	1 343	898	4.89	242.0	0.30	3.281	0.13	0.58	14.37	241.2	72.4
大足县	1 390	886	4.36	238.4	0.30	3.281	0.13	0.58	14.15	245.9	73.8
荣昌县	1 079	995	4.16	271.7	0.30	3.281	0.13	0.58	16.13	217.6	65.3
璧山县	912	947	3.65	257.1	0.30	3.281	0.13	0.58	15.26	174.0	52.2
梁平县	1 890	1 289	11.03	361.4	0.30	3.281	0.13	0.58	21.46	507.0	152.1
城口县	3 286	1 582	41.88	450.1	0.30	3.281	0.13	0.58	26.72	1 097.6	329.3
丰都县	2 901	1 134	17.47	314.4	0.30	3.281	0.13	0.58	18.67	676.9	203.1
垫江县	1 518	1 281	8.75	358.8	0.30	3.281	0.13	0.58	21.30	404.2	121.3
武隆县	2 901	1 161	21.90	322.0	0.30	3.281	0.13	0.58	19.12	693.3	208.0
忠县	2 184	1 210	11.97	337.2	0.30	3.281	0.13	0.58	20.02	546.6	164.0
开县	3 959	1 686	45.11	471.6	0.30	3.281	0.13	0.58	28.00	1 385.8	415.7
云阳县	3 634	1 524	41.21	432.6	0.30	3.281	0.13	0.58	25.68	1 166.7	350.0
奉节县	4 087	1 344	37.62	377.6	0.30	5.415	0.13	0.58	37.00	1 890.0	567.0
巫山县	2 958	1 325	28.53	372.0	0.30	5.415	0.13	0.58	36.45	1 347.9	404.4
巫溪县	4 030	1 628	57.18	465.2	0.30	5.415	0.13	0.58	45.59	2 296.5	689.0
石柱县	3 013	1 320	24.75	370.4	0.30	5.415	0.13	0.58	36.29	1 367.0	410.1
秀山县	2 450	1 272	20.16	356.1	0.30	5.415	0.13	0.58	34.89	1 068.6	320.6
酉阳县	5 173	1 399	60.32	394.9	0.30	5.415	0.13	0.58	38.69	2 502.0	750.6
彭水县	3 903	1 471	41.16	416.4	0.30	5.415	0.13	0.58	40.80	1 990.8	597.2
江津市	3 200	997	15.73	271.9	0.30	3.281	0.13	0.58	16.15	645.8	193.7
合川市	2 356	1 008	10.16	275.7	0.30	3.281	0.13	0.58	16.37	482.1	144.6
永川市	1 576	959	6.36	260.6	0.30	3.281	0.13	0.58	15.47	304.8	91.4
南川市	2 602	973	13.25	264.5	0.30	3.281	0.13	0.58	15.70	510.7	153.2
全市合计	82 402	46 532	651	-	-	-	-	-	-	26 604	7 981

3.3 氮磷负荷的计算

污染物在土壤的吸附相与溶解相之间,按照土壤颗粒对一定的污染物的吸附能力,达到吸附平衡^[5]。因此,将面源污染负荷划分为颗粒态负荷(也称为固态污染负荷或吸附态污染负荷)与溶解态负荷:颗粒态负荷是由泥沙所吸附的污染物随泥沙一起被输送到水体中;溶解态负荷是溶解于水中的污染物随地表径流输送至水体中。

3.3.1 颗粒态氮磷 颗粒态污染物在迁移过程经过复杂的物理、化学变化:吸附与解吸、沉淀与溶解、矿化

与固定等,本文借助效能因子(O_i)用来表示污染物 i 的泥沙负荷,公式如下:

$$Y_i = O_i \times Y_s$$

式中: Y_i 为颗粒态污染物负荷或浓度; Y_s 为泥沙中污染物负荷或浓度; O_i 为效能因子。

O_i 是原土壤中污染物浓度与污染物的富集比的积,公式如下:

$$O_i = S_{js} \times ER_i \times 10^{-3}$$

式中: S_{js} 为污染物在土壤中的浓度, g/kg; ER_i 为污染物在污染源中与其在所研究对象中,或者积水面与出

水口之间的富集比。

则颗粒态负荷 Y_k 为:

$$Y_k = S_y \times Y_i$$

根据三峡库区秭归县紫色土壤实验^[3]结果中污染
物含量来计算,详细结果如表 3。

表 3 颗粒态污染物负荷计算表

项目	有机质	TN	NH ₃ - N	TP
降雨前表土 $S_{js}/g \cdot kg^{-1}$	14.02	0.69	0.047	0.35
侵蚀泥沙 $Y_s/g \cdot kg^{-1}$	21.48	1.16	0.078	0.51
富集比 ER_i	1.53	1.68	1.67	1.46
效能因子 O_i	2.1E-2	1.2E-3	7.8E-5	5.1E-4
污染物 i 浓度 $Y_i/g \cdot kg^{-1}$	4.6E-1	1.3E-3	6.1E-6	2.6E-4
颗粒态负荷 $Y_k/t \cdot a^{-1}$	36 823 568	107 392	485	20 759

3.3.2 溶解态氮磷 溶解态氮磷负荷计算式如下:

$$B = \sum_{i=1}^m C_i Q_i$$

式中: B 为径流中溶解态污染物负荷量; C_i 为 i 分区径
流污染物含量; Q_i 为 i 分区径流量。

因为各个分区内水体断面受到点源直接排放的波
动影响,故 C_i 选取水体污染负荷稳定的库首(流域出
口处)污染浓度作为计算统一值; Q_i 取整个重庆三峡
库区径流量 $651/10^8 \cdot t \cdot a^{-1}$,计算结果如下。

表 4 溶解态氮磷负荷计算

项目	TN	NH ₃ - N	TP
浓度/ $mg \cdot L^{-1}$	1.64	0.227	0.231
负荷/ $t \cdot a^{-1}$	106 780	14 780	15 040

注:源于重庆市环境质量报告中 1996~2000 年奉节县和巫山县境内
江水断面水质监测数据均值。

3.4 计算结果

计算结果见表 5,重庆三峡库区非点源污染颗粒
态氮负荷与溶解态氮负荷相当;颗粒态磷负荷略大于
溶解态磷负荷。

表 5 氮磷负荷汇总表

负荷	TN		NH ₃ - N		TP	
	/ $t \cdot a^{-1}$	%	/ $t \cdot a^{-1}$	%	/ $t \cdot a^{-1}$	%
颗粒态	107 392	50.1	485	3.2	20 759	58.0
溶解态	106 780	49.9	14 780	96.8	15 040	42.0
合计	214 173	-	15 265	-	35 799	-

注:颗粒态为 2000 年、溶解态为 1996~2000 年均值。

3.5 重庆三峡库区非点源污染负荷计算结果误差分析

根据表 6 知,土壤侵蚀量、泥沙量、TN 和 NH₃ -
N 误差较小,而 TP 误差较大,其原因可能出于土壤磷
含量大小、磷的富集比的影响。

表 6 计算误差分析表

指标	土壤侵蚀量 / $10^4 \cdot t \cdot a^{-1}$	泥沙量/ $10^4 \cdot t \cdot a^{-1}$	TN / $t \cdot a^{-1}$	NH ₃ - N / $t \cdot a^{-1}$	TP / $t \cdot a^{-1}$
计算值	26 604	7 981	214 173	15 265	35 799
统计值	25 260 *	7 536 *	175 558	19 337	58 881
绝对误差	1 344	445	38 615	- 4 072	- 23 082
相对误差 %	5.3	5.9	18.0	- 21.1	- 39.2

注: * 为 20 世纪 80 年代郭生炼对三峡库区水土流失研究成果,文中已
将其转化为相同面积下的土壤侵蚀量及泥沙量。

4 结论

1) 重庆三峡库区 N 的主要来源是化肥流失和水土
流失;P 的主要来源是化肥流失、水土流失和禽畜养
殖;COD 的主要来源主要是畜禽养殖和农村生活污
水;NH₃ - N 的主要来源是化肥流失、水土流失和农
村生活污水。

2) 运用 RUSLE 模拟计算颗粒态污染负荷并结合
溶解态污染负荷,估算入库非点源污染总负荷的方法
是可行的,同时给库区底质再悬浮释放溶解态氮磷的
迁移研究提供了计算颗粒态污染负荷、溶解态污染负
荷的简洁方法。

参考文献:

[1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业非点源污染形势估
计及控制对策 [J]. 中国农业科学,2004,37(7):1 008 - 1
017.

[2] 吴刚,苏瑞平. 三峡库区移民安置区生态农业发展模式的
研究 [J]. 应用生态学报,1998,9(6):8 - 21.

[3] 黄丽,丁树文,蔡崇法等. 三峡库区紫色土坡地养分状况
及养分流失 [J]. 地理研究,1996,4(1):665 - 668.

[4] 张建国,范建容,王玉宽等. 重庆市降雨侵蚀力(R 值)的
时空分布特征 [J]. 水土保持研究,2004,11(1):56 - 59.

[5] 王晓燕. 非点源污染及其管理 [M]. 北京:海洋出版社,
2003.

[6] 景可. 长江上游泥沙输移比初探 [J]. 泥沙研究,2002,
(11)1:53 - 59.

[7] 陈和平,张明树,周焕强,王昭林. 重庆年鉴 2005 [M]. 重
庆:重庆年鉴社,2005.

[8] 黄真理,李玉梁,陈永灿等. 三峡水库水质预测和环境容
量计算 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

(编辑 胡 玲)