

南京市 2001 ~ 2008 年水土流失的时空变化与治理成效研究*

马力¹ 卜兆宏^{1†} 彭桂兰² 夏立忠¹ 李运东¹ 杨林章¹ 姜小三³
黄睿³ 吴玉敏²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 南京市水利局, 南京 210008)

(3 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要 利用 2001 ~ 2008 年气象资料和地理信息系统数据库, 采用“监测水土流失的定量新方法”对南京市各区县和小流域 8 年期间水土流失状况进行了定量监测和分析。结果表明: (1) 8 年期间南京市平均轻度以上(包括轻度)水土流失面积为 858.5 km², 平均轻度以上水土流失总量为 206.4 × 10⁴ t, 全市水土流失主要发生在丘陵山区; (2) 南京地区水土流失存在年内和年度变化特征, 其侵蚀月份多数发生在 4 ~ 8 月, 侵蚀最严重年度为 2003 年, 最轻年度为 2001 年, 最接近 8 年平均监测年度为 2006 年; (3) 各区县、镇街和小流域 8 年平均水土流失状况存在差异, 就土壤流失总量、轻度以上面积和强度以上面积而言, 最严重的是江宁区, 其次是六合区, 最严重小流域是江宁区百家湖和上坝河小流域; (4) 8 年来南京市水土流失控制成效显著, 侵蚀模数由中度降为轻度, 土壤流失总量、流失面积和急需治理面积均大幅减少; 水土保持措施实施和植被覆盖面积增加, 使南京市生态环境状况有明显改善; (5) 水土流失治理成效分析说明, 植被覆盖率增加和水土保持措施对控制水土流失具有明显的作用。

关键词 南京市; 水土流失; 定量监测; 时空变化; 治理成效
中图分类号 S157 **文献标识码** A

南京是中国长江下游地区的经济、文化、金融中心之一, 也是一座山水城林相互辉映的滨江城市。进入 21 世纪以来, 随着政府的重视、全民生态环境意识的增强以及水土保持资金投入的增加, 南京市水土保持和生态环境状况有了明显改善。但是随着经济建设的快速发展, 各类开发和基础设施建设等也掀起高潮, 需大量开发土地开采沙石, 在部分区县仍存在坡地开垦、毁林开采现象, 主城周边农村的水环境状况不容乐观。因此, 在南京水土保持和生态环境普遍改善的同时, 依然存在一些地区水土流失加剧的潜在问题, 水土流失已成为制约本地区经济和社会发展的的重要因素之一^[1]。分析 2000 年以后南京市水土流失状况的时间和空间分布变化, 继续开展水土流失的定量动态监测, 对

于进一步改善南京市整体生态环境状况, 具有重要意义。本次研究旨在定量监测南京市各区县、各大流域、各镇街和各小流域在 2001 ~ 2008 各年和 8 年平均的水土流失分布、程度及总量等动态变化结果, 并且分析其变化的主要原因, 明确水土流失的变化趋势和重点治理区域, 以便为今后南京地区的水土流失防治和决策提供科学依据。

1 研究区概况与监测分析方法

1.1 研究区概况

南京市位于北纬 31°14′ ~ 32°36′, 东经 118°32′ ~ 119°14′, 包括玄武、白下、鼓楼、建邺、秦淮、下关(上述六区合称为市区)、雨花台、栖霞、江宁、六合、浦

* 国家自然科学基金项目(40171060)和中国科学院知识创新工程重大项目“重大工程生态环境效应监测与评估”(KZCX1-YW-08-01)资助

† 通讯作者, E-mail: zhbu@issas.ac.cn

作者简介: 马力(1979—)男, 汉族, 博士, 助理研究员, 主要从事三峡库区生态环境保护和水土流失防治以及土壤生态系统养分循环与面源污染控制研究。E-mail: lma@issas.ac.cn

收稿日期: 2009-11-10; 收到修改稿日期: 2010-04-27

口 11 个区和溧水、高淳 2 个县。全市总面积约 6 598 km² ,其中丘陵岗地面积占全市总面积的 63% ,平原洼地占 24% ,江河湖泊等水面占 11% 。该市属于北亚热带季风气候区 ,年平均气温 17.8℃ ,日照时数 1 687 h ,四季明显 ,降水丰沛 ,年平均降雨量 1 034 mm ,6 ~ 9 月降雨量占全年的 60%~70% 。南京地区主要水域为长江、秦淮河、水阳江、滁河、固城湖和石臼湖等 ,总蓄水量约 4.28 亿 m³ 。地形起伏较大 ,降水集中、强度大 ,土地开发利用规模不断扩大 ,构成了该地区水土流失加剧的潜在因素。

1.2 监测分析方法与资料

本研究水土流失监测的方法是采用“监测水土流失的定量新方法”^[2-4]。该方法主要由水土流失定量监测预报模型、面源污染监测模型、模型因子算式算法原则及其软件、DEM 精度评价新方法^[5]、GPS 快速实测更新 GIS 的实用方法^[6]和监测结果建库查询法等九项内容组成。土壤年流失量监测模型为:

$$A_i = f \cdot R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot CP_i \quad (1)$$

式中 R 为降雨侵蚀力因子 ,单位为 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹; K 为土壤可蚀性因子 ,单位为 t hm² h hm⁻² MJ⁻¹ mm⁻¹; LS 为地形的坡长因子 L 与坡度因子 S 之积 ,无量纲单位; CP 为植被、作物覆盖因子 C 与

保土措施因子 P 之积 ,无量纲单位; f 为转换系数 100 将土壤流失量 A 的单位 t hm⁻² a⁻¹ 转换为我国常用单位 t km⁻² a⁻¹; i 为栅格像元号。该模型形式与美国的 USLE、RUSLE^[7-8] 相同 ,但模型因子算式算法系由我国各水蚀区大量实测数据所建 ,并且是基于栅格像元运算 ,其算式算法和软件与 USLE、RUSLE 有显著不同。

降雨资料的收集和整理主要围绕计算 2001 ~ 2008 年的降雨侵蚀力 R 值而进行。收集雨量代表站和一般站点的降雨数据资料 ,按照“监测水土流失定量新方法”对降雨资料整理的原则 ,选择位置、地形和雨量居中的站为代表站 ,并摘取其降雨自记纸的降雨特征数据。本研究选择的代表站是南京下关、六合、月塘水库和天生桥站。根据获得的降雨特征数据 ,计算出各次降雨的侵蚀动能 E 和降雨侵蚀力 R 值^[9-10]。本次定量监测所使用的行政区界图、DEM 图、土壤图、土地利用图等基础数据来源于“南京市水土保持地理信息系统 (NJSwcGis)”数据库 ,并对近年来行政区界变动的地方进行了修正 ,获得了最新的区县和镇街界图、土地利用图和 DEM 图(图 1)。卫星遥感数据图分别使用了 2008 年 4 月 3 日接收的南京地区 CCD 遥感数据和 2000 年 4 月 17 日接收的 TM 遥感图像。

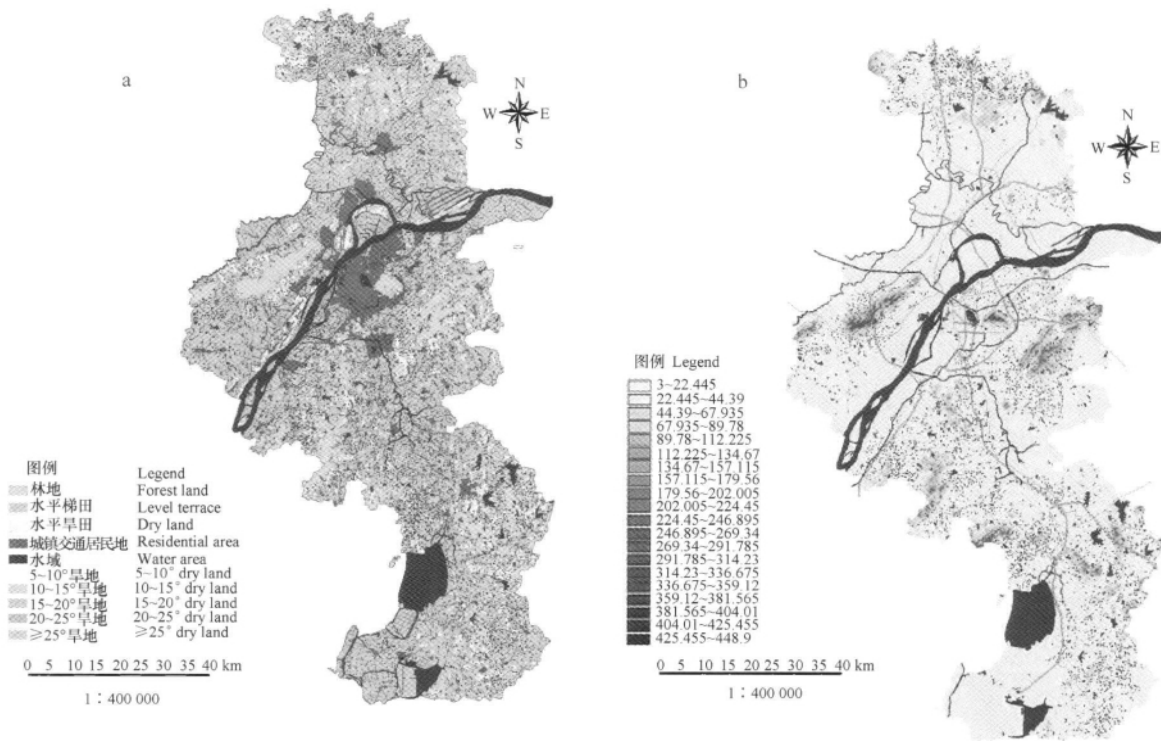


图 1 南京市土地利用图(a) 和数字高程模型 DEM(b)

Fig. 1 Land use map (a) and digital elevation model (DEM) (b) of Nanjing

2 结果与分析

2.1 2001~2008 年南京市各区县水土流失面积和流失量监测

利用配置水系的南京市数字高程模型 DEM 和 SL 软件,可获得坡度因子 S 与坡长因子 L 的乘积 SL_i 像元图(图 2)和地形坡度像元图(图 3),全市 SL_i 值变化范围在 $0 \sim 44.45$,均值为 0.6774 ,坡度变化范围在 $0^\circ \sim 51^\circ$,均值为 1.69° 。对比两图发现,凡坡度大的深红色部位,其 SL_i 值也较大,显示为深红色,凡坡度小的淡红色部分,其 SL_i 值则相应较小。

利用 ArcView 软件将 2001~2008 年各气象观测站点获得的数据进行处理,可获得 2001~2008 年各年的降雨侵蚀力 R_i 值像元图。将各年的 R_i 值像元图相叠加,其和除以 8,可得到 2001~2008 年平均 R_i 值的像元图(图 4),其 R_i 值变化范围在 $174.9 \sim 286.8$, R_i 平均值为 239.6 ,全市北部的 R_i 值普遍高于南部。图 5 为利用同样方法获得的 1997~2000 年 4 年平均的 R_i 值像元图,其变化范围在 $131 \sim 233$, R_i 平均值为 174.8 ,可见近 8 年来,全市的降雨侵蚀力明显增大。植被覆盖与保土措施因子乘积 CP_i 像元图是根据南京地区卫星遥感数据和土地利用图编制 2008 年和 2001 年获得的南京全市 CP_i 像元图如图 6 和图 7 所示。南京全市土壤类型较多,分布有 7 个土类,14 个亚类,16 个土属和 26 个土种,其可蚀性因子 K_i 值变化范围在 $0.02 \sim 0.66$,平均 K_i 值为 0.2581 ,如图 8 所示。

按照式(1)模型要求将各因子数据和图像在 IDRISI 图像处理系统中运算,可获得 2001~2008 年各年和 8 年的平均土壤年流失量的监测图,其数值为实数,变化范围很大。因此,利用专用软件按照《土壤侵蚀分类分级标准》的侵蚀模数分级标准,将图像数据分别转换为微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈共 6 个流失等级,并转换为 0~6 的 Byte 数据,便获得 2001~2008 年各年和 8 年平均的水土流失定量监测图(图 9),以图像形式清晰显示了南京全市土壤侵蚀的分布现状。使用专用软件对实数的监测图进行统计,可获得各项监测数据和结果。利用南京市水文局上、下游水文点实测数据评价监测结果的平均监测精度为 82.8%。

监测结果表明,2001~2008 年南京市平均轻度

以上(包括轻度)水土流失面积为 858.5 km^2 ,其中中山丘区面积 839.9 km^2 ,平原圩区面积 18.56 km^2 。8 年全市年平均轻度以上水土流失总量为 $206.4 \times 10^4 \text{ t}$,其中山丘区为 $204.1 \times 10^4 \text{ t}$,平原圩区为 $2.23 \times 10^4 \text{ t}$ 。8 年全市平均土壤侵蚀模数为 $2404 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中山丘区为 $2430 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,平原圩区为 $1158 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。由统计结果看出,南京市水土流失主要发生在丘陵山区,占丘陵山区总面积 22%,其侵蚀模数比较高,平均侵蚀模数已近中度流失级。平原圩区轻度以上水土流失面积不大,主要分布在区县周边开发区等,其侵蚀强度为轻度级。

根据对各区县的监测统计显示 2001~2008 年全市各平均轻度以上水土流失面积,由大至小分别为:江宁区 275.9 km^2 、六合区 177.9 km^2 、溧水县 138.8 km^2 、浦口区 109.8 km^2 、栖霞区 59.1 km^2 、高淳县 45.8 km^2 、雨花台区 29.3 km^2 、市区 22 km^2 。8 年各区县年平均轻度以上水土流失总量由大至小分别为:江宁区 $75 \times 10^4 \text{ t}$ 、六合区 $41.9 \times 10^4 \text{ t}$ 、浦口区 $27 \times 10^4 \text{ t}$ 、溧水县 $21.4 \times 10^4 \text{ t}$ 、栖霞区 $21 \times 10^4 \text{ t}$ 、雨花台区 $8.2 \times 10^4 \text{ t}$ 、高淳县 $6.5 \times 10^4 \text{ t}$ 、市区 $5.2 \times 10^4 \text{ t}$ 。8 年各区县平均土壤侵蚀模数为:栖霞区 $3546 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、雨花台区 $2801 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、江宁区 $2720 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、浦口区 $2465 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、六合区 $2357 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、市区 $2348 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、溧水县 $1544 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、高淳县 $1438 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。从上述结果看出,水土流失面积和水土流失总量以江宁、六合、溧水、浦口区县较大。土壤侵蚀模数以栖霞区最大,雨花台区次之,虽然这两个区水土流失面积不大,但在这期间因房地产开发、大学城建设和建设项目较多,造成土地严重扰动,遇降雨形成较大的侵蚀模数。江宁区水土流失面积较大,平均侵蚀模数已达中度级,该区水土流失在全市范围内还是比较严重的。

2.2 2001~2008 年南京市 8 大流域水土流失面积和流失量监测

通过对南京市 8 大流域水土流失监测结果的分析,2001~2008 年全市 8 大流域轻度以上及各流失等级平均水土流失面积、水土流失总量、土壤侵蚀模数,如表 1 和表 2 所示。从表中看出,沿江流域、秦淮河流域、滁河流域轻度以上水土流失面积较大,分别为 283 km^2 、 266 km^2 、 180 km^2 。土壤侵蚀模数以沿江流域、滁河流域、秦淮河流域较为严重,分别为 $2825 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2431 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2376 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

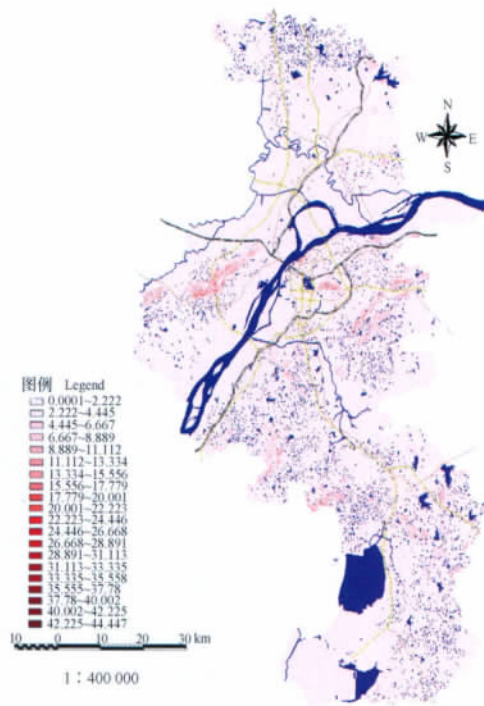


图 2 坡度与坡长因子 LS 像元图

Fig. 2 Pixel map of slope and slope length factor LS .

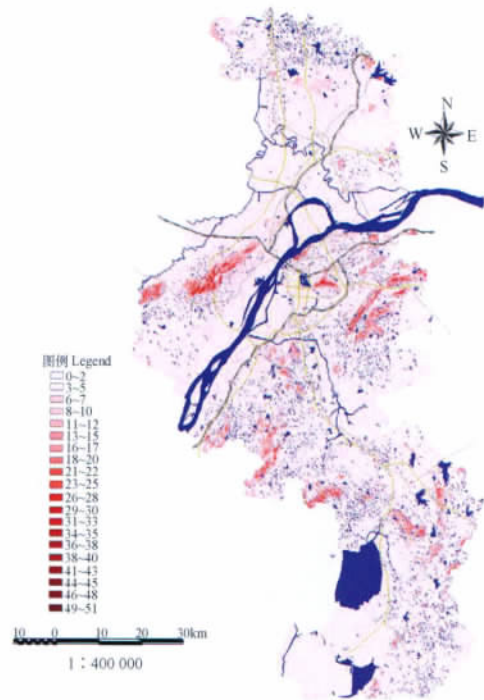


图 3 地形坡度像元图

Fig. 3 Pixel map of topographic slope

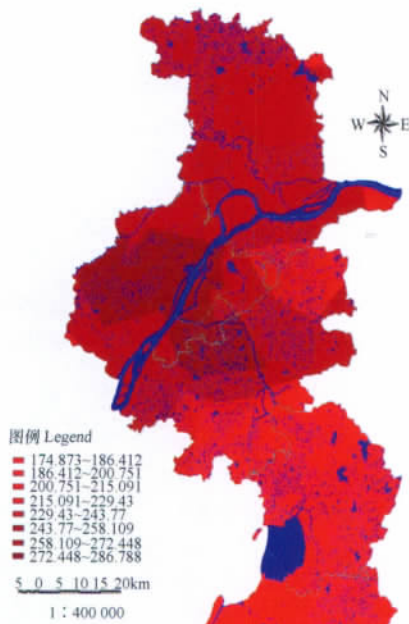


图 4 2001 ~ 2008 年平均 R_i 像元图

Fig. 4 Pixel map of mean R_i (Year 2001 ~ 2008)

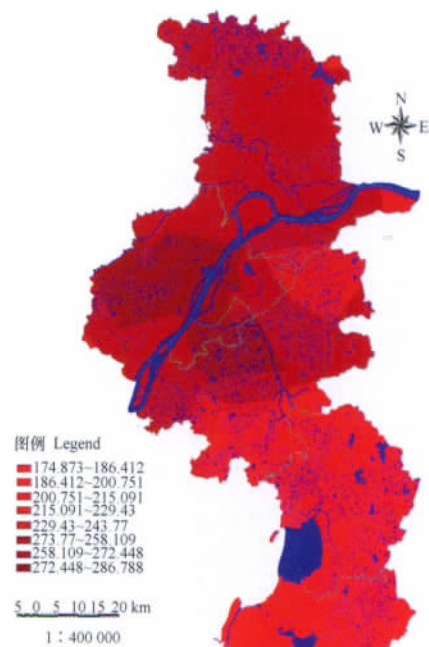


图 5 1997 ~ 2000 年平均 R_i 像元图

Fig. 5 Pixel map of mean R_i (Year 1997 ~ 2000)

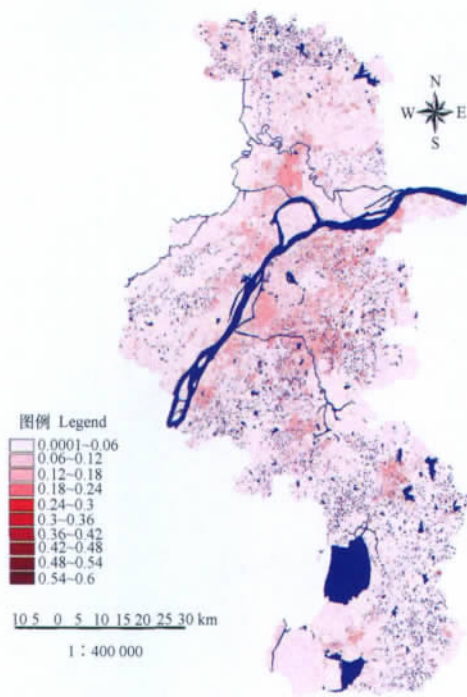


图 6 2008 年 CP_i 像元图

Fig. 6 Pixel map of CP_i in 2008

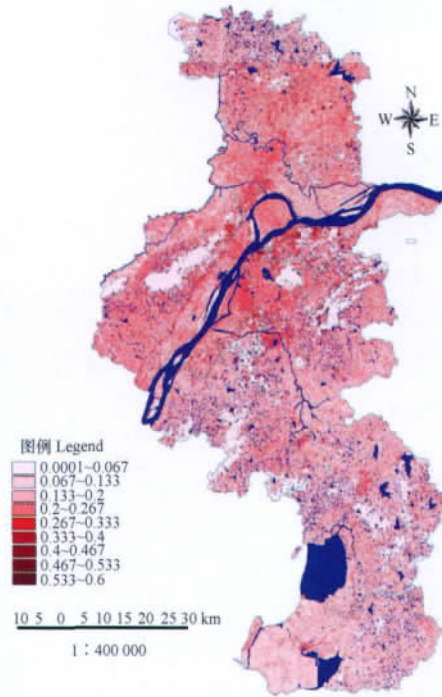


图 7 2000 年 CP_i 像元图

Fig. 7 Pixel map of CP_i in 2000

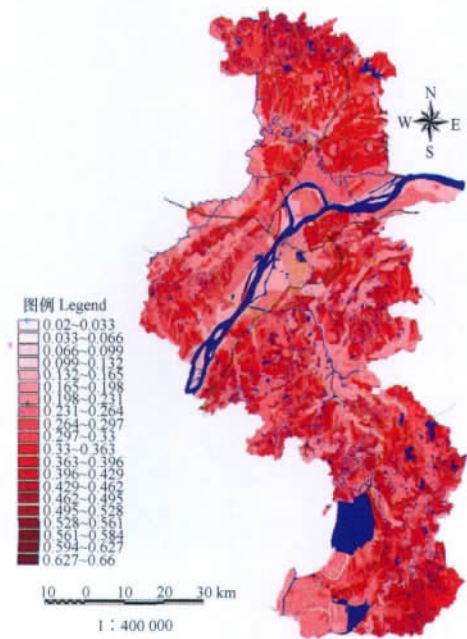


图 8 土壤可蚀性因子 K_i 像元图

Fig. 8 Pixel map of soil erodibility factor K_i

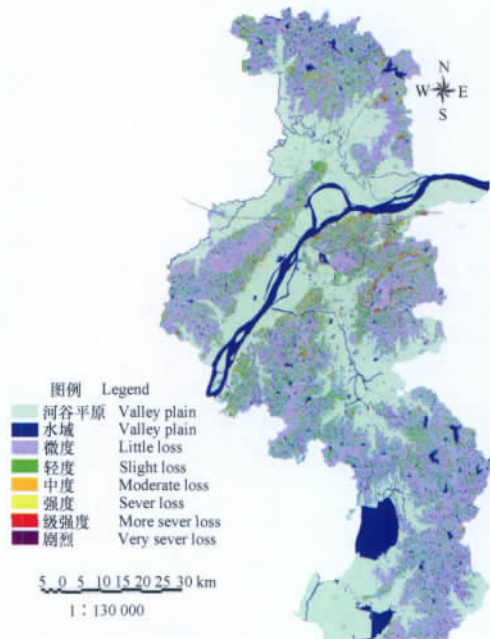


图 9 2001 ~2008 年 8 年平均水土流失定量监测图

Fig. 9 Quantitative monitoring map of average soil erosion of the 8 years from 2001 to 2008

表 1 南京市 8 大流域 2001 ~ 2008 年平均水土流失面积监测结果

Table 1 Average area of soil erosion of the 8 grand water catchments in Nanjing area from 2001 to 2008

流域名称 Basin	总面积 Total area	水域面积 Water surface area	水土流失等级						
			轻度以上 Slight loss and over	微度 Little loss < 500	轻度 Slight loss 500 ~ 2 500	中度 Moderate loss 2 500 ~ 5 000	强度 Severe loss 5 000 ~ 8 000	极强度 More severe loss 8 000 ~ 15 000	剧烈 Very severe loss ≥ 15 000
沿江流域 Along Yangtze Basin	1 953	264.4	283.3	1 405	192.7	48.16	21.63	15.89	4.96
淮河流域 Huaihe Basin	122.4	9.30	20.82	92.33	18.31	1.56	0.51	0.33	0.10
太湖流域 Taihu Basin	186.6	8.44	115.02	163.1	13.79	0.85	0.23	0.15	0.01
秦淮河流域 Qinhuaihe Basin	1 629	87.76	265.9	1 276	203.5	34.72	13.13	10.07	4.44
滁河流域 Chuhe Basin	1 486	90.45	179.8	1 216	136.2	22.66	10.13	7.58	3.17
石臼湖流域 Shijiuhu Basin	714.4	153.5	62.49	498.4	55.20	5.08	1.25	0.70	0.26
固城湖流域 Guchenghu Basin	460.1	55.66	27.21	377.2	23.83	2.25	0.73	0.38	0.03
南漪湖流域 Nanyihu Basin	37.97	1.42	3.96	32.59	3.63	0.24	0.05	0.04	0.01
合计 Total	6 590	671.0	858.5	5 060	647.2	115.5	47.65	35.15	12.98

注: 流失等级单位为 $t km^{-2} a^{-1}$; 各项流失面积单位为 km^2 Note: Unit of the soil erosion grade is $t km^{-2} a^{-1}$; Unit of the area of soil erosion in each item is km^2

表 2 南京市 8 大流域 2001 ~ 2008 年平均水土流失量监测结果

Table 2 Average amounts monitored of water and soil losses in the 8 grand catchments in Nanjing area from 2001 to 2008

流域名称 Basin	总流失量 Total loss amount	轻度以上		微度 Little loss < 500	轻度 Slight loss 500 ~ 2 500	中度 Moderate loss 2 500 ~ 5 000	强度 Severe loss 5 000 ~ 8 000	极强度 More severe loss 8 000 ~ 15 000	剧烈 Very severe loss ≥ 15 000
		Slight loss and over							
		流失量 Loss amount	侵蚀模数 Erosion modulus						
沿江流域 Along Yangtze Basin	917.0	800.4	1 855	116.6	216.8	168.0	136.3	168.0	111.2
淮河流域 Huaihe Basin	46.71	31.88	2 267	14.83	17.76	5.258	3.184	3.585	2.089
太湖流域 Taihu Basin	35.00	19.98	3 086	15.02	14.03	2.837	1.431	1.536	0.153
秦淮河流域 Qinhuai he Basin	758.9	631.7	2 529	127.2	219.2	119.7	82.45	108.0	102.4
滁河流域 Chuhe Basin	554.0	437.0	2 322	116.9	138.2	79.21	63.79	80.29	75.50
石臼湖流域 Shijiuhu Basin	139.1	96.00	2 387	43.08	58.59	17.15	7.739	7.393	5.129
固城湖流域 Guchenghu Basin	62.17	41.32	2 629	20.85	24.74	7.661	4.531	3.907	0.487
南漪湖流域 Nanyihu Basin	9.638	5.369	2 252	4.269	3.701	0.792	0.297	0.447	0.131
合计 Total	2 522	2 064	2 404	458.8	693.1	400.6	299.7	373.2	297.2

注: 各项流失量单位为 $10^3 t$; 年侵蚀模数单位为 $t km^{-2} a^{-1}$; 流失等级侵蚀模数单位为 $t km^{-2} a^{-1}$ Note: Unit of the amount of soil and water loss is t ; Unit of the erosion modulus is $t km^{-2} a^{-1}$; and Unit of the erosion modulus of each soil erosion grade is $t km^{-2} a^{-1}$

2.3 2001~2008 年南京市水土流失时空变化分析

2.3.1 水土流失时间变化分析 根据降雨记录监测结果 2001~2008 年不同年份以及同一年份各月的总雨量和 R 值均有较大差别,因此,不同时间段的水土流失量和流失面积也有较大差异。统计表明 8 年期间平均 4~8 月的雨量占全年总雨量的 65%,而 4~8 月的 R 值则占全年 R 值的 97%,其中 2008 年 4 月份天生桥站的 R 值最大。全市水土流失的年度变化在 8 年中差别也很大,如图 10 和图 11 所示,流失最大的年份是 2003 年,流失总量 $426.6 \times 10^4 \text{t}$,侵蚀模数 $3086 \text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$,轻度以上侵蚀面积 1202km^2 ,强度以上急需治理侵蚀面积 173.4km^2 。比较流失量和流失面积,2003 年是最小年份 2001 年流失总量的 2.96 倍,侵蚀模数的 1.66 倍,轻度以上侵蚀面积的 2.16 倍,急需治理侵蚀面积的 58.7 倍。8 年平均的各项数据与 2006 年较为相同。依据其变化大小排序为:2003 年、2007 年、2006 年、2002 年、2004 年、2005 年、2008 年、2001 年。产生水土流失年度变化的主要原因是降雨侵蚀力的年度差异。

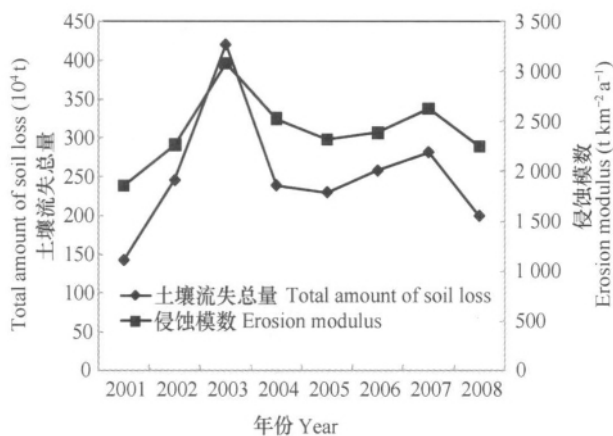


图 10 侵蚀模数和土壤流失总量的年度变化

Fig. 10 Inter-annual variation of the total soil and water loss and erosion modulus

南京市水土流失定期监测目前进行了两次。一次是 1997~2000 年,定期为 4 年,一次是 2001~2008 年,定期为 8 年。图 12 显示了两次定期监测各项年平均数据的差异。对于侵蚀模数,4 年平均已达中度级别($2604 \text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$),而 8 年平均则已降为轻度级别($2404 \text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$)。对于流失总量,4 年平均为 $397.6 \times 10^4 \text{t}$,是 8 年平均 $252.2 \times 10^4 \text{t}$ 的 1.58 倍。对于轻度以上流失面积,4 年平均为 1289km^2 ,是 8 年平均 858.5km^2 的 1.50 倍;强度以上流失面积,4 年平均为 154.4km^2 ,是 8 年平均

95.78km^2 的 1.61 倍。

产生水土流失定期年平均变化的原因,主要涉及降雨侵蚀力 R 值和植被覆盖度 CP 值的变化。从降雨侵蚀力 R 值来看,8 年平均 R 值为 239.6,是 4 年平均 R 值的 1.37 倍,说明近 8 年的自然降雨侵蚀动力较过去 4 年增大。而从消减侵蚀力的植被覆盖与保土因子 CP 值来看,8 年平均 CP 值为 0.0483,较 1997~2000 年平均 CP 值 0.1191 减小了 1.47 倍,说明近 8 年来各项水土保持措施增加了植被覆盖和水土保持其他措施,具备抵御更大降雨侵蚀力的能力,使 8 年平均的侵蚀模数、流失总量和轻度以上侵蚀面积皆较 4 年平均的显著减小。由此可见,近 8 年来南京市的水土流失控制已取得了显著成效,全市生态环境状况有了明显改善。

2.3.2 水土流失空间变化分析 水土流失不仅有同一地区不同年份中的时间变化,也有同一地区同一年份的不同区县、镇街、小流域的空间分布变化。表 3 将 8 年水土流失平均监测结果中各区县的侵蚀模数、土壤流失总量、轻度以上面积和强度以上面积共 4 项指标做了百分比计算和排序,以便说明各区县的水土流失空间分布差异。全市 8 个区县(含市区)由大到小排序:就侵蚀模数而言为栖霞区、雨花区、江宁区、浦口区、六合区、市区、溧水县、高淳县;就土壤流失总量而言为江宁、六合、浦口区、溧水县、栖霞区、高淳县、雨花区、市区;就轻度以上面积而言为江宁、六合区、溧水县、浦口、栖霞区、高淳县、雨花区、市区;就强度以上面积而言为江宁、六合、栖霞、浦口区、溧水县、雨花区、市区、高淳县。

从水土流失 8 年和 4 年平均变化分析,土壤侵蚀强度由中度降至轻度,年均水土流失总量减少 38%,年均水土流失面积减少 33%,说明近 8 年来南京全市水土保持和生态环境状况有着明显改善。可以发现,8 年平均 R 值大于 4 年平均 R 值 1.37 倍,说明 8 年降雨的侵蚀动力增大,而土壤可蚀性因子 K 、坡长与坡度因子 LS 的变化不大,因此,主要是植被因子 C 和水土保持措施因子 P 变化较大,才会使全市水土流失向好的方向转化。2008 年 CP 值较 2000 年 CP 值减少 1.47 倍,说明 8 年间全市的植被面积大为增加,水土流失的工程措施,如坡耕地改造、沟道治理等得到加强,而人为造成水土流失的因素,如乱垦乱伐、坡耕种植等则大为减少,使水土保持和生态环境状况有较大改善。自 2000 年后,南京市实施了“生态南京”、“绿色南京”规划,每年的绿化面积以平均 6 千余 hm^{-2} 增加,丘陵山区大部分

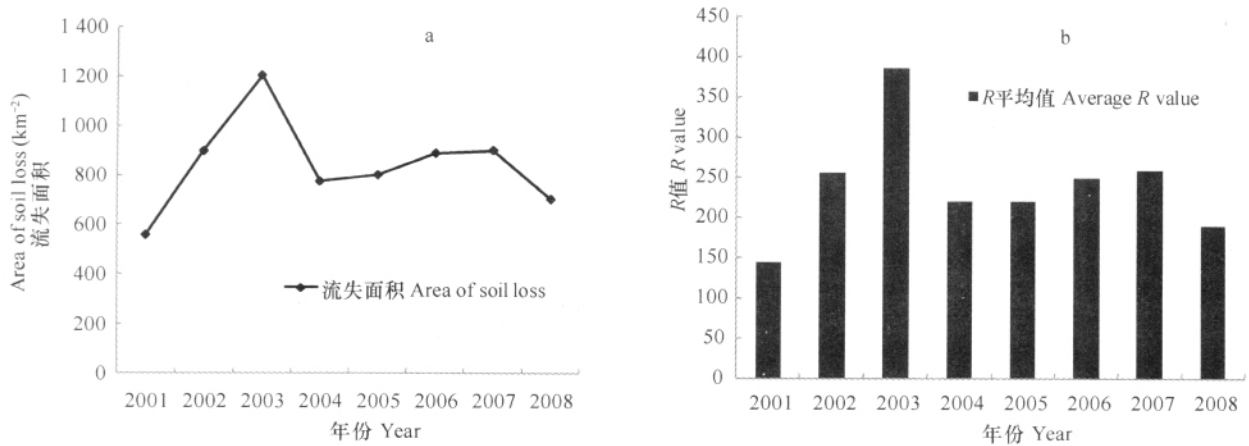


图 11 土壤轻度以上流失面积(a)及 R 均值(b)的年度变化
Fig. 11 Inter-annual variation of the area of soil slight erosion and over (a) and average R (b)

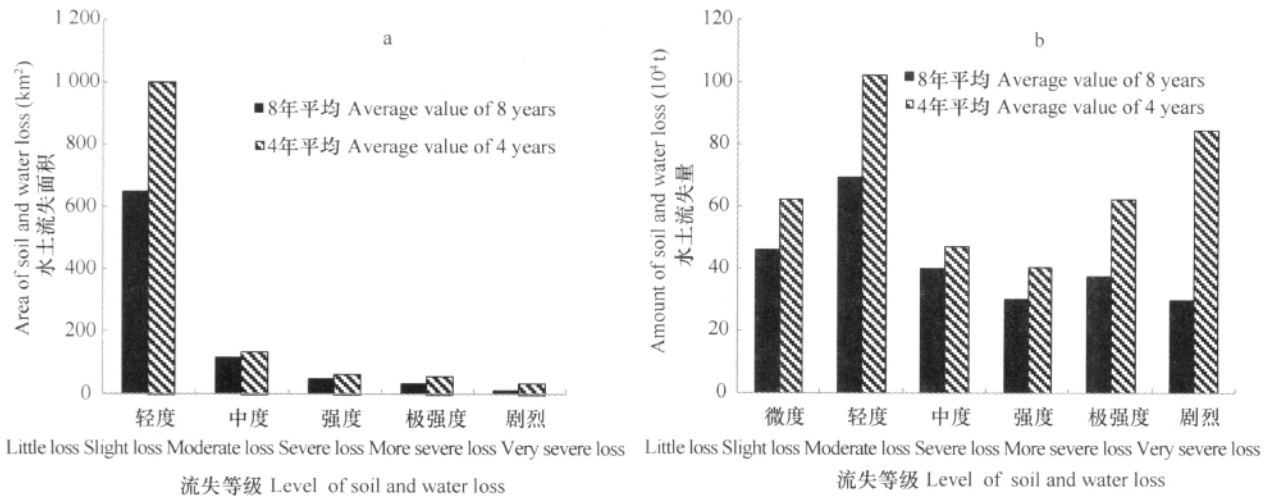


图 12 2001 ~ 2008 年期间 8 年与 1997 ~ 2000 期间 4 年不同等级流失面积 (a) 和流失量 (b) 年平均变化

Fig. 12 Variation of the annual mean area (a) and amount of soil erosion (b) of each erosion grade in the 8 years from 2001 to 2008 and 4 years from 1997 to 2000

表 3 南京市各区县水土流失空间分布差异与变化

Table 3 Spatial variations of soil and water loss among districts and counties of Nanjin

区县 Region	侵蚀模数 Erosion modulus (t km ⁻² a ⁻¹)		流失总量 Total loss amount (10 ⁴ t)		轻度以上流失面积 Area of soil erosion light and over(km ²)		强度以上流失面积 Area of soil erosion severe and over(km ²)	
	A	B	A	B	A	B	A	B
	六合 Liuhe	2 484	2 357	86.6(21.8)	53.7(21.3)	284.3(22.1)	177.9(20.7)	31.16(20.2)
浦口 Pukou	2 712	2 465	61.7(15.5)	32.7(13.0)	196.5(15.3)	109.8(12.8)	26.50(17.2)	12.23(12.8)
雨花 Yuhua	2 860	2 801	10.0(2.5)	9.3(3.7)	30.3(2.4)	29.3(3.4)	4.67(3)	4.72(4.9)
栖霞 Xixia	4 265	3 546	32.3(8.1)	22.7(9.0)	68.7(5.3)	59.1(6.9)	14.66(9.5)	13.31(13.9)
江宁 Jiangning	2 819	2 720	116.6(29.3)	86.6(34.3)	363.5(28.2)	275.9(32.1)	48.81(31.6)	36.59(38.2)
市区 Downtown	3 822	2 348	14.0(3.5)	6.6(2.6)	30.6(2.4)	22.0(2.6)	5.14(3.3)	2.24(2.3)
溧水 Lishui	1 977	1 544	57.8(14.5)	29.8(11.8)	241.2(18.7)	138.8(16.2)	19.57(12.7)	5.07(5.3)
高淳 Gaochun	1 605	1 438	18.7(4.7)	10.7(4.2)	73.1(5.7)	45.8(5.3)	3.80(2.5)	1.60(1.7)
总计 Total	2 604	2 404	397.6	252.2	1288.2	858.5	154.3	95.78

注: A 为 4 年平均监测结果; B 为 8 年平均监测结果; 括号内数据为占总计百分比(%) Note: A is the average of the 4 years; B is the average of the 8 years; the number in the bracket is the percentage of total (%)

采石宕口实施了禁采,坡耕地改造开展了退耕还林以及修建梯田等,这些措施也反映了近 8 年来 CP 值的变化,说明全市水土保持成效和生态环境状况正在向着良性方向发展。

2.3.3 水土流失治理成效分析 为分析 8 年期间南京水土流失治理成效,本研究进行了两种模拟性监测分析。一种是假设 2000 年的植被覆盖率和保土措施等未变,而遇 8 年平均 R 值的降雨侵蚀力。该情况将使 8 年平均的轻度以上流失面积增加为 $1\,646\text{ km}^2$,是现在 858.5 km^2 的 1.92 倍,并且土壤流失总量增加为 $555.6 \times 10^4\text{ t}$,是现在 $252.2 \times 10^4\text{ t}$ 的 2.20 倍。另一种是假设 8 年的 R 值为 4 年平均的 R 值,而遇 2008 年 CP 值的植被覆盖率和保土措施等。该情况将使 8 年平均的轻度以上流失面积减少为 669.0 km^2 ,是现在 858.5 km^2 的 0.78 倍,土壤流失总量减少为 $180.3 \times 10^4\text{ t}$,是现在 $252.2 \times 10^4\text{ t}$ 的 0.71 倍。上述虽为模拟性监测结果,但也说明了植被覆盖度和水土保持措施增加对减少水土流失的显著效益。

3 结 论

1) 定量监测结果表明 8 年期间南京全市平均轻度以上(包括轻度)水土流失面积为 858.5 km^2 ,其中山丘区面积 839.9 km^2 ,平原圩区面积 18.56 km^2 ;平均轻度以上水土流失总量为 $206.4 \times 10^4\text{ t}$,其中山丘区为 $204.1 \times 10^4\text{ t}$,平原圩区为 $2.23 \times 10^4\text{ t}$ 。全市水土流失主要发生在丘陵山区,平原圩区水土流失面积不大,其侵蚀强度较轻。

2) 全市水土流失存在年内和年度变化特征,其侵蚀月份多数发生在 4~8 月,最严重年度为 2003 年,最轻年度为 2001 年,就流失面积和急需治理面积而言,2001 年和 2003 年监测结果分别相差 2.16 倍和 58.7 倍,而最接近 8 年平均监测的年度为 2006 年。

3) 全市各区县、各镇街和各小流域 8 年平均水土流失状况有显著差异。就土壤流失总量、轻度以上面积和强度以上面积而言,最严重的是江宁区,其次是六合区,最严重的镇街是江宁区汤山街道,最严重的小流域是江宁区百家湖和上坝河小流域。

4) 8 年(2001~2008 年)和 4 年(1997~2000 年)的平均监测结果显示,近 8 年来南京全市水土流失控制成效显著,侵蚀模数由中度降为轻度,土壤流失总量、流失面积和急需治理面积均大幅减

少。水土保持措施的实施和植被覆盖面积的增加,使南京全市水土保持和生态环境状况有了明显改善。

5) 水土流失治理成效分析说明,植被覆盖率增加和水土保持措施,对控制水土流失具有明显的作用。

参 考 文 献

- [1] 林杰,张金池,吴玉敏,等. 南京市水土流失的现状、原因及防治对策. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(2): 44—46. Lin J, Zhang J C, Wu Y M, et al. The current situation and causes of water and soil losses in Nanjing and its conservation strategies (In Chinese). Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2008, 32(2): 44—46
- [2] 姜小三,卜兆宏,杨林章,等. 水土流失与水质污染一体化定量监测的初步研究——以江苏省方便流域为例. 土壤学报,2005,42(4): 529—536. Jiang X S, Bu Z H, Yang L Z, et al. Integrated quantitative monitoring of soil loss and water pollution—A case study of Fangbian valley in Jiangsu Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 529—536
- [3] 卜兆宏,孙金庄,董勤瑞,等. 应用水土流失定量遥感方法监测山东全省山丘区的研究. 土壤学报,1999,36(1): 1—8. Bu Z H, Sun J Z, Dong Q R, et al. Study on quantitative remote sensing method for soil erosion losses and its application in Shandong Province, China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(1): 1—8
- [4] 夏立忠,卜兆宏,张祖兴,等. 土壤与养分流失综合监测方法在密云水库流域的应用. 地球科学进展,2007,22(3): 241—248. Xia L Z, Bu Z H, Zhang Z X, et al. Application of integrated method to assessment of soil and nutrient losses in Miyun Reservoir Basin (In Chinese). Advances in Earth Science, 2007, 22(3): 241—248
- [5] 卜兆宏,杨晓勇,王库,等. 水土流失定量监测中的 DEM 精度评价新方法. 土壤学报,2004,41(5): 661—667. Bu Z H, Yang X Y, Wang K, et al. New method for accuracy evaluation of DEM (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 661—667
- [6] 卜兆宏,姜小三,杨林章,等. 水土流失定量监测中 GPS 实测更新 GIS 数据的实用方法研究. 土壤学报,2005,42(5): 712—719. Bu Z H, Jiang X S, Yang L Z, et al. The experiment of optimum methods of renewing GIS data by GPS solid survey in the soil erosion fixed quantity monitoring (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 712—719
- [7] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning. Agriculture Handbook Number 537. Washington D C: U S Dept. of Agriculture, 1978: 58
- [8] Renard K G, Foster G R, Weesies G A. Predicting soil erosion by water — A guide to conservation planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook Number 703. Washington D C: U S Dept. of Agriculture, 1997: 404

- [9] 卜兆宏,董勤瑞,周伏建,等. 降雨侵蚀力因子新算法的初步研究. 土壤学报,1992,29(4): 408—417. Bu Z H, Dong Q R, Zhou F J, et al. Preliminary study on new algorithm of erosivity factor of rainfall (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(4): 408—417
- [10] 卜兆宏,唐万龙. 降雨侵蚀力因子(R)最佳算法及其应用的研究成果简介. 中国水土保持,1999(6): 16—17. Bu Z H, Tang W L. A brief introduction of the best algorithm of rainfall erosivity (R) and its application (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1999(6): 16—17

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF SOIL AND WATER LOSS AND ITS CONTROL IN NANJING AREA FROM 2001 TO 2008

Ma Li¹ Bu Zhaohong^{1†} Peng Guilan² Xia Lizhong¹ Li Yundong¹
Yang Linzhang¹ Jiang Xiaosan³ Huang Rui³ Wu Yumin²

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

(2 *Nanjing Water Conservancy Bureau, Nanjing 210008, China*)

(3 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract Based on meteorological data and the data in the Geographic Information System (GIS) database of Nanjing area during the period from 2001 to 2008, soil and water losses in various districts, counties and small watersheds of Nanjing were quantitatively analyzed, with a new method for “quantitative monitoring of soil and water loss”. Results show that: (1) during the period, the area of lands subjected to soil erosion light or over was averaged 858.5 km², losing a total of 206.4 × 10⁴ t of soil; and the soil erosion occurred mainly in hilly areas; (2) the soil erosion was characterized by annual and inter-annual variations; which show that soil erosion occurred mostly from Apr. to Aug.; and it was the most serious in 2003, the least in 2001, and the closest to the average of the 8 years; (3) spatial variation of the average soil erosion existed among the districts, towns, and small watersheds; in terms of total amount of soil loss, and areas of lands subjected to light and serious soil erosion, Jiangning District ranked first and was followed by Liuhe District; and Baijia Lake and Shangba River were the most serious in soil erosion among the small watersheds; (4) the effect of the efforts of Nanjing to control soil and water loss was very significant; The erosion modulus declined from moderate to light, and the total amount of soil loss; the area of the lands subjected to soil loss and the area of the lands in urgent need for control areas all significantly decreased; and the area of the lands where soil erosion control measures had been implemented and the area of the land covered by vegetation increased, thus significantly improving the eco-environment of Nanjing; (5) the analysis of the effect of the control of soil erosion indicated that the increase in vegetation coverage and the implementation soil erosion control measures are effective in controlling soil erosion.

Key words Nanjing; Soil and water loss; Quantitative monitor; Temporal and spatial variation; Control effects