

# 松花江流域侵蚀产沙演变特征分析

焦剑<sup>1</sup>, 赵登峰<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 地理学与遥感学学院, 北京 100875; 2. 哈尔滨市水务局, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 利用松花江流域 116 个站点的降水资料和 14 个典型流域水文站的径流泥沙资料, 在分析降水、径流和输沙时间变化特征的基础上, 研究了该区侵蚀产沙演变特征及其主要影响因素。研究结果表明, 1961—1990 年松花江流域降水和径流无显著增长趋势, 但输沙量增长显著, 每 10 a 平均增长幅度为 34.7%, 丘陵漫岗区输沙量增长幅度较山区更为显著。流域输沙量自 1979 年开始显著增加, 降水量变化不是输沙量快速增长的主要原因, 人类活动导致的下垫面变化可能是输沙量增加的重要原因。

**关键词:** 侵蚀产沙; 时间变化; 人类活动; 松花江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0087-05

中图分类号: S157, TV141

## Evolution of Sediment Yield in the Songhua River Basin

JIAO Jian<sup>1</sup>, ZHAO Deng-feng<sup>2</sup>

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Heilongjiang Water Resource Bureau, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** Severe soil erosion has threatened land resources in Northeastern China, however, a few researches were conducted on sediment yield in the region. To study the characteristics of the evolution of sediment yield in the Songhua River basin, the characteristics of temporal variation of precipitation were analyzed by using daily precipitation records from 116 stations and the characteristics of temporal variation of runoff and sediment load were analyzed based on daily runoff and sediment yield data from 14 typical hydrological stations. Results showed that from 1961 to 1990, there was no obvious increasing trend of precipitation or runoff in the studied watersheds, but the increasing trend of sediment load was obvious, with an average trend of 34.7% in each 10 years, and the trend was more obvious in hilly region than mountainous region. Sediment yield has increased sharply since 1979 and human activities, rather than precipitation, may play an important role in the increase of sediment yield.

**Keywords:** sediment yield; temporal variation; human activity; Songhua River basin

土壤侵蚀已成为全球最主要的环境问题之一。严重的水土流失导致大量泥沙淤积中下游地区的河道、水库, 影响水利工程的正常运行, 给防洪带来极大的威胁。同时, 侵蚀产生的泥沙吸附和携带了大量污染物, 造成水体污染, 水质恶化。因此长期以来, 流域侵蚀产沙问题受到广泛关注, 而人类活动对流域径流输沙的影响也一直是区域资源、环境与可持续发展研究中的热点问题<sup>[1-3]</sup>。有关流域径流输沙演变特征的研究已遍及全国大多数地区。其中, 水土流失十分严重的黄土高原一直是研究的重点地区。熊贵枢等<sup>[4]</sup>分析了黄河 1919—1989 年间输沙变化; 王万忠、焦菊英<sup>[5]</sup>利用 122 个水文站的径流泥沙资料, 全面分析了

黄土高原侵蚀产沙量的时空变化; 朱照宇等<sup>[6]</sup>计算了黄土高原全新世以来 5 个阶段的平均古侵蚀强度和流域输沙量。从 20 世纪 60 年代开始对黄河流域进行大规模水土流失治理以来, 众多学者在水土保持措施对流域侵蚀产沙的影响方面进行了深入分析<sup>[7-9]</sup>。1998 年长江流域发生特大洪灾之后, 长江中上游地区侵蚀产沙研究明显增多, 学者们在分析该区径流输沙时间变化特征的同时, 探讨了水利工程和水土流失治理对流域侵蚀产沙的影响<sup>[9-11]</sup>。

相对全国其它主要水系而言, 松花江流域侵蚀产沙的研究较少, 相关研究多侧重于水资源评价方面<sup>[12]</sup>, 对人类活动对流域径流输沙的影响研究更为

收稿日期: 2009-09-14

修回日期: 2010-01-12

资助项目: 国家重点基础研究发展(973)规划项目课题“区域水土流失过程与趋势分析”(2007CB407203); 水利部松花江辽河流域委员会“东北黑土区水土流失综合防治试点工程”

作者简介: 焦剑(1983—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: 68283847@qq.com。

欠缺。新中国成立以来,随着人口增加,该区水土资源所承受的人口与社会发展的压力不断递增<sup>[13-14]</sup>,所面临的环境问题日益严重。本研究利用水文站观测的径流泥沙资料及气象和雨量站观测的降水资料,在分析 20 世纪 60—80 年代东北地区经济建设和土地开发期间,松花江流域径流输沙时间变化特征的基础上,揭示该区侵蚀产沙的演变特征及其与降水变化和人类活动的关系,从而为流域水土保持规划和环境治理提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料收集

收集了松花江流域 36 个气象站和 80 个雨量站,总计 116 个站点 1961—1990 年逐日降水资料,以分析降水的时间变化特征。同时,收集了上述气象站 1961—1990 年逐日积雪深度资料,以划分融雪侵蚀期和降雨侵蚀期。为了分析松花江流域径流和输沙的时间变化特征,收集了 14 个水文站 1961—1990 年逐日径流量和泥沙含量(悬移质)资料。各水文站资料年限多在 26~30 a,平均 27.6 a。松花江水系由嫩江、第二松花江和松花江干流这 3 大水系构成,本研

究将直接注入嫩江、第二松花江或松花江干流的河流称为一级支流,直接注入一级支流的称为二级支流,依此类推。其中 1 个属于三级支流控制站,5 个属于二级支流控制站,7 个属于一级支流控制站,1 个位于内流区。水文站控制的流域面积为 390~25 292 km<sup>2</sup>,平均为 7 545 km<sup>2</sup>(表 1)。

松花江流域三面环山,西部和北部为大兴安岭和小兴安岭(合称兴安岭山地),流域东部及东南部为完达山脉、老爷岭、张广才岭和长白山脉(合称流域东部山地)。山地以中低山为主,海拔高度多在 500 m 以上。兴安岭山地和流域东部山地自其山前丘陵区 and 漫川漫岗区向流域中心地带的平原过渡,区内海拔高度多在 200~500 m。其中,兴安岭山前丘陵漫岗区地势逐渐变缓,多为丘陵状、波状和稍倾斜的台地,地面坡度多在 5° 以下,坡长较长。流域东部山地山前的丘陵漫川漫岗区面积较广,区内多为波状起伏的丘陵,山前的冲积洪积台地区域地形复杂。研究区流域中,7 个流域的主体海拔高度在 200~500 m,地貌类型以丘陵漫川漫岗为主;7 个流域的主体海拔高度在 500 m 以上,地貌类型以山地为主。

表 1 流域基本情况

流域 序号	所属河流			流域面积 km <sup>2</sup>	地貌 类型	水文站			资料 年限/a
	水系	河流名称	支流级别			名称	经度/(°)	纬度/(°)	
1	嫩江	诺敏河	1	25 292	山地	古城子	124.27	48.53	63~87
2	嫩江	归流河	2	7 656	山地	大石寨	121.35	46.28	64~89
3	二松	拉法河	1	2 426	丘陵	蛟河	127.32	43.70	61~90
4	二松	辉发河	1	12 391	丘陵	五道沟	126.62	42.88	61~88
5	二松	二道江	1	8 532	山地	汉阳屯	127.95	42.65	64~90
6	二松	伊通河	2	574	丘陵	伊通	125.30	43.35	61~90
7	二松	金沙河	2	1 037	丘陵	民立	126.75	43.13	61~90
8	二松	珠子河	3	390	山地	靖宇	126.80	42.38	61~90
9	松干	汤旺河	1	19 186	山地	晨明	129.48	46.97	64~89
10	松干	倭肯河	1	4 185	丘陵	倭肯	130.52	46.02	63~89
11	松干	牡丹江	1	8 075	山地	大山咀子	128.60	43.68	63~90
12	松干	乌斯浑河	2	3 288	山地	大盘道	130.08	45.65	65~89
13	松干	忙牛河	2	5 240	丘陵	大碾子沟	127.07	45.10	63~89
14	内流区	乌裕尔河	—	7 354	丘陵	依安	125.52	47.88	63~89

注:表中“丘陵”指丘陵和漫川漫岗地貌。

### 1.2 研究方法

由于研究区降雨侵蚀和融雪侵蚀均有明显发生<sup>[15]</sup>,为了分别分析融雪和降雨侵蚀产沙时间变化特征,规定融雪侵蚀期是指积雪初日到积雪终日之间的时期,其余为降雨侵蚀期<sup>[16]</sup>。其中,积雪初终日依据流域内气象站的逐日积雪资料确定。统计上述 116 个降水站点 1961—1990 年逐年降水量及各年融雪侵蚀期和降雨侵蚀期降水量,以及各研究流域逐年及各

年融雪侵蚀期和降雨侵蚀期内径流量和输沙量。对上述统计资料进行 3 a 滑动平均,以分析降水、径流和输沙的年度变化趋势(%/10 a)。采用最小二乘法获得要素年值与时间的线性回归方程的斜率,其 10 的倍数称该要素的变化速率,单位为“要素单位/10 a”;变化趋势则为依据变化速率计算的某要素 10 a 内的增长量与依据线性方程计算的该要素初始年的值的比值(%/10 a)。

研究视降水为可能对径流输沙产生影响的气候因子,为了判断其对径流输沙年际变化的影响,以决定系数  $R^2$  分别检验年降水量与年径流量和输沙量之间的相关关系。同时,为了体现人类活动对径流输沙的影响,采用了双累积曲线的分析方法,以消除降水变化的影响。研究将某要素与时间的双累积曲线的曲线斜率出现显著变化的点做为该要素时间变化的突变点,进而分析不同地貌类型区径流输沙年际变化的差异,并对侵蚀产沙时间变化的主要影响因素进行了初步分析。

## 2 结果分析

### 2.1 降水、径流和输沙的年际变化特征

松花江流域大部分地区年降水量呈增长趋势,但总体而言,增长幅度不大。嫩江以西大兴安岭山区及其山前丘陵台地年降水递增趋势较为明显,多在  $5 \sim 7.5(\%/10\text{ a})$  之间。呈递减趋势的地区主要位于长白山区、小兴安岭东部山区及其山前丘陵台地,但其趋势并不明显,多在  $-2.5(\%/10\text{ a})$  之间。其它地区则有微弱的递增趋势,变化趋势介于  $0 \sim 5(\%/10\text{ a})$  之间。降雨侵蚀期降水量的年际变化趋势及其空间分布基本与年降水一致,只是在降水增长的地区,增长幅度略低于年降水,大多介于  $0 \sim 5(\%/10\text{ a})$  之间。该区融雪侵蚀期降水呈显著的增长趋势,其增长速率自松嫩平原、三江平原两个大于  $15(\%/10\text{ a})$  的高值中心向其西、北、南方向的大小兴安岭和长白山区递减(图略)。但该区降雪量较小,大多仅占降水总量的  $7\% \sim 20\%$ <sup>[16]</sup>,且降雪增长速率较快的地区主要位于降雪较少的松嫩平原地区(年平均  $30 \sim 50\text{ mm}$ ),故其变化趋势对年降水的整体变化趋势影响并不明显。

各研究流域中,位于大兴安岭山区的古城子和大石寨流域年降水增幅较为显著,分别为  $6.5$  和  $8.1(\%/10\text{ a})$ 。其它流域中 6 个年降水呈增加趋势,递增趋势介于  $0.2 \sim 3.7(\%/10\text{ a})$  之间; 6 个呈减少趋势,递减趋势介于  $-1.5 \sim -0.1(\%/10\text{ a})$  之间(表 2)。各流域年降水变化趋势平均为  $1.3(\%/10\text{ a})$ ,总体变化幅度不大。各流域年径流量的时间变化趋势与降水量较为相似,年降水增幅较为显著的古城子和大石寨流域年径流量增加趋势较为显著,其它流域中 6 个年径流量呈增加趋势,递增趋势介于  $0.3 \sim 4.6(\%/10\text{ a})$  之间; 6 个呈递减趋势,递减趋势介于  $-8.8 \sim -0.2(\%/10\text{ a})$  之间(表 2),其中大盘道和倭肯流域递减趋势较为显著。各流域年径流量变化趋势平均为  $0.7(\%/10\text{ a})$ 。

表 2 流域降水量、径流量和输沙量年际变化

流域序号	站点名	地貌类型	变化幅度( $\%/10\text{ a}$ )			输沙突变点年份
			降水量	径流量	输沙量	
1	古城子	山地	6.5	5.4	34.0	1979
2	大石寨	山地	8.1	11.2	39.1	1984
3	蛟河	丘陵	1.0	0.8	51.9	1979
4	五道沟	丘陵	-0.4	0.8	17.6	1980
5	汉阳屯	山地	-1.4	-0.8	18.8	1979
6	伊通	丘陵	1.3	4.3	47.9	1979
7	民立	丘陵	1.3	3.3	65.5	1980
8	靖宇	山地	-0.1	-3.8	26.8	—
9	晨明	山地	-0.4	-1.6	1.5	—
10	倭肯	丘陵	3.7	-6.2	59.2	1980
11	大山咀子	山地	0.2	4.6	28.5	1979
12	大盘道	山地	-1.5	-8.8	20.8	1980
13	大碾子沟	丘陵	0.7	0.3	39.0	1983
14	依安	丘陵	-0.2	-0.2	34.9	1981
平均			1.3	0.7	34.7	

注:“—”表示输沙量变化过程无显著突变点。

图 1 a、1 b 分别是位于山区的典型流域古城子和位于丘陵漫岗区的典型流域蛟河的年降水、径流和输沙的变化曲线。由图 1 中可以看出,相较于降水和径流量的变化,流域的输沙量增长趋势十分显著,各流域输沙量的增幅在  $17.6(\%/10)$  ~  $65.5(\%/10\text{ a})$  之间,14 个流域输沙量的增长趋势平均为  $34.7(\%/10\text{ a})$ (表 2)。依据 14 个流域输沙量增长趋势的平均值,可推算出 1961—1990 年 30 a 来各流域输沙量平均增加了 128%。在不同的侵蚀期,输沙量增长趋势亦明显高于降水量和径流量,而降雨侵蚀期输沙量增长趋势更为显著,增长速率为  $36.0(\%/10\text{ a})$ ,高于融雪侵蚀期的  $26.2(\%/10\text{ a})$ 。且自 20 世纪 90 年代以来,冬季气温、降水呈暖干变化趋势<sup>[17]</sup>,有可能降低融雪径流输沙能力。当然,这一推论尚需更长序列的资料验证。

### 2.2 流域径流量影响因素分析

研究流域年径流量  $Q(10^8\text{ m}^3)$  与年降水量  $P(\text{mm})$  呈显著的线性关系,以决定系数  $R^2$  进行相关检验,则各流域两者决定系数变化于  $0.488 \sim 0.876$ ,平均为  $0.706$ ,且均在  $0.01$  的置信水平上呈显著相关。图 2 a、2 b 分别是位于山区的典型流域古城子和位于丘陵漫岗区的典型流域蛟河的径流量与降水量的双累积曲线。从图中可以看出,年降水与年径流量增长趋势保持一致,即径流量对降水量的年际变化具有显著的反馈响应。但值得注意的是,位于松花江流域东部边缘的倭肯和大盘道流域(图略),径流量的变化趋势与降水量的变化趋势存在一定差异:两个流域降水量变化趋势分别为  $3.7(\%/10\text{ a})$  和  $-1.5(\%/10\text{ a})$ ,

并无显著的递减趋势;而径流量则呈显著的递减趋势,分别为 $-6.2(\%/10\text{ a})$ 和 $-8.8(\%/10\text{ a})$ 。由逐年降水量和径流量的双累积曲线可见,倭肯流域径流量增长幅度在 1973—1980 年间明显减缓,1981 年开始增长幅度有所回升,大盘道流域年降水径流也有类似的变化特征。这可能是由于 20 世纪 60—70 年代,流域内水利工程的兴建和人口迅速增长、工农业快速

发展对水资源的需求<sup>[18]</sup>,使得地表水资源的消耗日益增加;20 世纪 80 年代以来,大量岗坡地、河流中下游两岸堤外的泄洪区、沼泽湿地也被开垦,地表植被覆盖明显减少,使得流域截流、蓄水能力大大削弱<sup>[19]</sup>,增加了地表径流对土壤的冲刷。上述流域人类活动对地表径流影响作用的过程和机理尚需进一步深入研究。

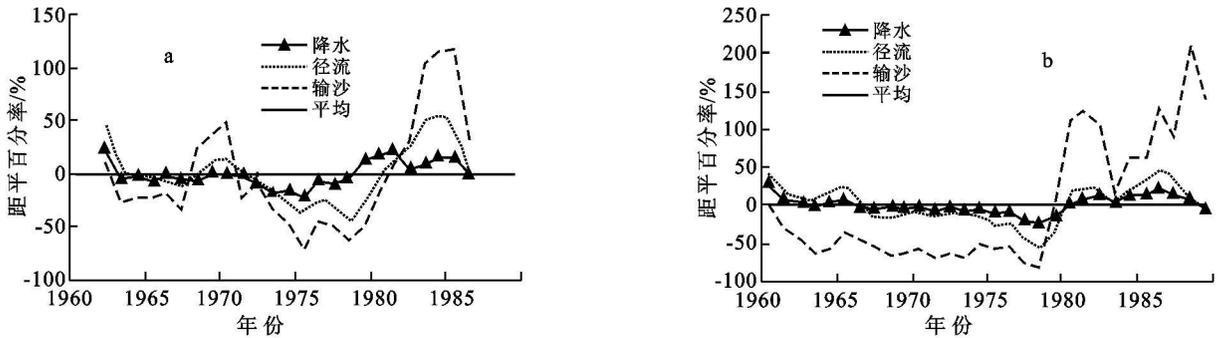


图 1 古城子(a)和蛟河(b)流域年降水、径流和输沙距平百分率曲线(3 a 滑动平均)

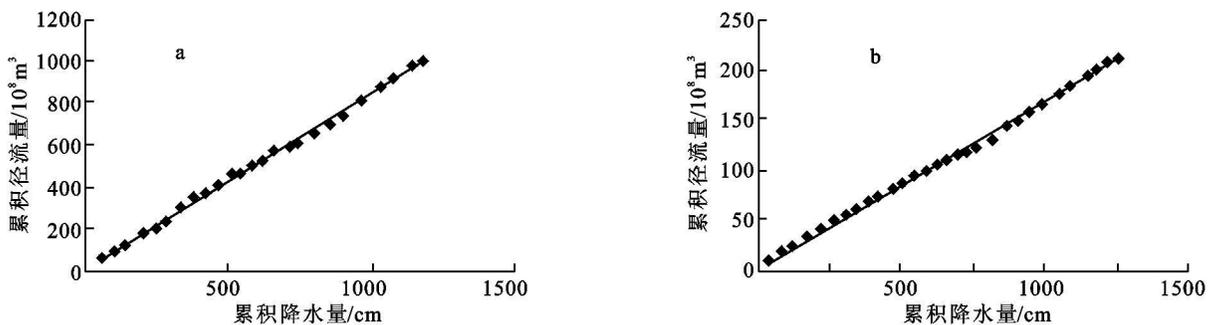


图 2 古城子(a)和蛟河(b)流域年降水量与径流量双累积曲线

### 2.3 流域输沙量影响因素分析

流域年输沙量与年降水量之间存在一定的关系,两者拟合的线性方程决定系数  $R^2$  在 0.199 ~ 0.718,平均为 0.427。回归方程决定系数  $R^2$  随着流域输沙量增长趋势的递增而呈现明显的下降趋势。对于输沙量增长趋势 $< (20\%/10\text{ a})$ 的流域而言,决定系数  $R^2$  平均 0.630;在输沙量增长趋势介于 20 ~ 40 $(\%/10\text{ a})$ 的流域,  $R^2$  明显递减,平均为 0.415;而在输沙量增长趋势 $> 40(\%/10\text{ a})$ 的流域,  $R^2$  进一步递减,平均为 0.296。由此可见,对于输沙量增长趋势较快的流域而言,降水在其变化中所起到的影响作用较小;而流域下垫面状况的变化可能对其有重要的影响。

由流域年降水量和输沙量的双累积曲线分析可以得出,年输沙量的变化存在显著的突变点。统计各流域突变点出现的时间变化于 1979—1984 年之间,大多为 1979 或 1980 年(表 2)。

由各流域逐年输沙总量变化曲线亦可看出(图 3a),在此之前,年输沙量略呈下降趋势;而在此之后,年输沙量增加趋势十分显著。降雨侵蚀期和融雪侵蚀期流域输沙量也呈这样的变化趋势(图 3b—c),这可能与人类活动有关。

新中国成立以来,东北地区几次大的垦荒过程加剧了水土流失<sup>[20]</sup>,致使侵蚀产生的大量泥沙进入河道,流域输沙量迅速增加。在人类生产活动影响更为显著的丘陵漫岗区,虽然降水量和径流量的增长速率略低于山区,但输沙量增长趋势却显著高于山区,平均高达  $45.1(\%/10\text{ a})$ ,比山区高  $20.9(\%/10\text{ a})$ 。流域日益增长的输沙量已造成渠道、水库淤塞,增加洪水隐患,污染水质,威胁着人民群众的生产生活。以倭肯河中上游的勃利县为例,该县 24 座小型水库总淤积量达  $4.82 \times 10^7\text{ m}^3$ ,占总兴利库容的 31%。其中,现有兴利库容 60% 以上的库容有 7 座,30% ~ 60% 之内的有 11 座,30% 下的有 6 座,少数水库已全部淤平,致使渡汛存在一定危险<sup>[19]</sup>。

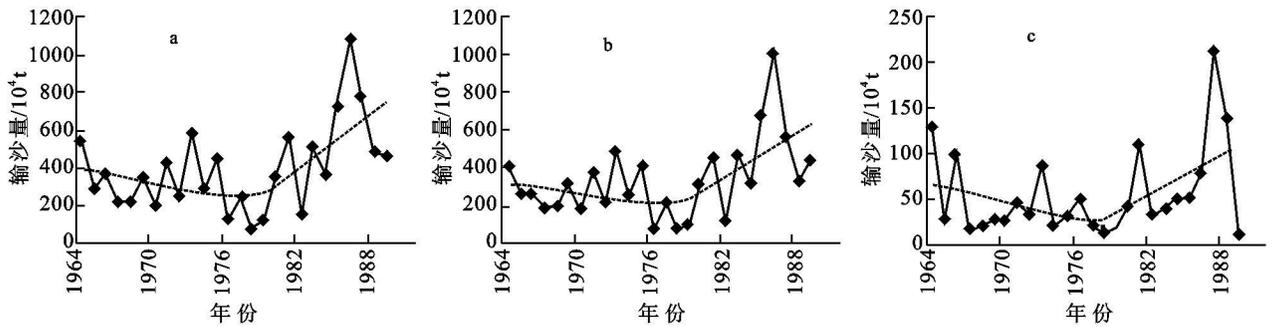


图3 流域全年(a)、降雨侵蚀期(b)和融雪侵蚀期(c)年输沙总量变化

由于受资料限制,研究未能进一步探讨人类活动对流域径流输沙的影响,今后应全面收集松花江流域水利工程和土地利用管理等方面的资料,结合时间序列更长的水文资料,分析人类活动对流域径流输沙的影响,从而为模拟土地利用管理对流域侵蚀产沙的影响提供依据。

### 3 结论和讨论

(1) 1961—1990年松花江流域降水和径流无显著增长趋势,但输沙量增长十分显著,平均为34.7(%/10a)。就不同地貌类型而言,丘陵漫岗区输沙量增长趋势更为显著,达45.1(%/10a),山区为24.2(%/10a)。

(2) 流域输沙量自1979年开始显著增加,降水量变化不是其快速增长的主要原因,人类活动导致的下垫面变化可能是输沙增长的重要原因。新中国成立以来,东北地区经历了几次大的垦荒过程;此后,对土地资源的无序开发仍在继续。1980年以来,土地以户承包分散经营后,农民生产积极性增加;再加之农业生产机械化水平的提高,推动了开荒的进程,加剧了东北地区水土流失,致使侵蚀产生的大量泥沙进入河道,流域输沙量迅速增加。

(3) 导致流域侵蚀产沙出现显著年际变化趋势的主要原因有土地利用方式的变化、水利工程的兴建和气候变化等<sup>[21]</sup>。本研究因资料类型和时间序列的限制,仅初步分析了降水和人类活动对松花江流域侵蚀产沙演变特征的影响,未能进一步探讨人类活动对流域径流输沙的影响,今后应进一步收集人文活动和水利建设方面资料,以及时间序列更长的水文气象资料,在进一步分析人类活动对流域侵蚀产沙演变特征影响的同时,分析水利工程的兴建对流域侵蚀产沙的影响,以及气候变化可能带来的影响。

#### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] Lorup K G, Refsgaard J C, Mazvimavi D. Assessing

the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modeling: Case studies from Zimbabwe [ J ]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 147-163.

[ 2 ] Walling D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers [ J ]. *Geomorphology*, 2006, 79: 192-216.

[ 3 ] Houben P, Hoffmann T, Zimmermann A, et al. Land use and climatic impacts on the Rhine system (Rhein-LUCIFS): Quantifying sediment fluxes and human impact with available data [ J ]. *Catena*, 2006, 66: 42-52.

[ 4 ] 熊贵枢, 之俊峰, 徐建华, 等. 1919—1989年黄河的水沙变化分析 [ J ]. *水土保持学报*, 1992, 6(2): 1-6.

[ 5 ] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙与黄河输沙 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1996.

[ 6 ] 朱照宇, 周厚云, 谢久兵, 等. 黄土高原全新世以来土壤侵蚀强度的定量分析初探 [ J ]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 81-88.

[ 7 ] 许炯心, 孙季. 水土保持措施对流域泥沙输移比的影响 [ J ]. *水科学进展*, 2004, 15(1): 29-34.

[ 8 ] 师长兴. 黄土高原水土保持减沙效益的尺度效应初步分析 [ J ]. *水土保持通报*, 2006, 26(3): 51-54.

[ 9 ] 方春明, 毛继新, 鲁文. 长江中游与洞庭湖泥沙问题研究 [ M ]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 22-25.

[ 10 ] 李景保, 王克林, 秦建新, 等. 洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其成因 [ J ]. *地理学报*, 2005, 60(3): 503-510.

[ 11 ] 许炯心, 孙季. 长江上游干支流悬移质含沙量的变化及其原因 [ J ]. *地理研究*, 2008, 27(2): 332-342.

[ 12 ] 陈志恺. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究(水资源卷): 东北地区水资源供需发展趋势与合理配置研究 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-6.

[ 13 ] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状 [ J ]. *水土保持研究*, 2006, 13(3): 50-54.

[ 14 ] 刘昌明. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究(生态与环境卷): 东北地区水与生态环境问题及保护对策研究 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2007: 191-193.

(下转第96页)

失(相当于林地与灌丛地的 3~5 倍)的特点。

(2) 林地与灌丛地在土壤侵蚀总体特征方面差异不显著,具有相近的水土保持功能。

(3) 相同地类不同土壤层次在土壤侵蚀方面具有明显差异,A 层土紧实度相对较小,冲刷模数较大。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 郑永春,王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析[ J ]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 461-465.
- [ 2 ] 高华端. 贵州岩溶地区地质条件对水土流失的影响[ J ]. 山地农业生物学报, 2003, 22(1): 20-22.
- [ 3 ] 龙俐,熊康宁,王代懿,等. 贵州花江喀斯特峡谷水土流失及治理效果[ J ]. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2005, 23(3): 13-18.
- [ 4 ] 李新爱,肖和艾,吴金水,等. 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响[ J ]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1827-831.
- [ 5 ] 龙健,李娟,邓启琼,等. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究[ J ]. 土壤通报, 2006, 37(4): 635-639.
- [ 6 ] 蒋天明,魏朝富,谢德体,等. 贵州中部喀斯特地区黄壤持水性能的研究[ J ]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 25-29.
- [ 7 ] 覃勇荣,岑忠用,刘旭辉,等. 桂西北石漠化地区不同植被恢复模式土壤性状的初步研究[ J ]. 河池学院学报, 2006, 26(5): 34-41.
- [ 8 ] 张继光,陈洪松,苏以荣. 喀斯特地区典型峰丛洼地表层土壤水分空间变异及合理取样数研究[ J ]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 114-117.
- [ 9 ] 苏维词. 贵州喀斯特山区的土壤侵蚀性退化及其防治[ J ]. 中国岩溶, 2001, 20(3): 217-222.
- [ 10 ] 万军,蔡运龙,路云阁. 喀斯特地区土壤侵蚀风险评价:以贵州省关岭布依族苗族自治县为例[ J ]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 148-153.
- [ 11 ] 高华端,李锐. 喀斯特地区原状土的可蚀性[ J ]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 1-4.
- [ 12 ] 张素红,李森,李红兵. 粤北石漠化地区土壤侵蚀初步研究[ J ]. 中国岩溶, 2006, 25(4): 280-284.
- [ 13 ] 吴秀芹,蔡运龙,蒙吉军. 喀斯特山区土壤侵蚀与土地利用关系研究:以贵州省关岭县石板桥流域为例[ J ]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 46-48, 77.
- [ 14 ] 毕庆涛,姜国萍,丁树云. 含水量对红黏土抗剪强度的影响[ J ]. 地球与环境, 2005, 33(3): 144-147.

(上接第 91 页)

- [ 15 ] 林燕. 松花江流域降雨-径流侵蚀力研究[ D ]. 北京:北京师范大学, 2004: 26-28.
- [ 16 ] 焦剑,谢云,林燕,等. 东北地区融雪期径流及产沙特征分析[ J ]. 地理研究, 2009, 28(2): 333-344.
- [ 17 ] 刘嘉麒. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究(自然历史卷): 东北地区自然环境历史演变与人类活动的影响研究[ M ]. 北京:科学出版社, 2007: 53-59.
- [ 18 ] 田广,李仁淑. 勃利县小型水库现状及对策[ J ]. 吉林水利, 2008(5): 65-66.
- [ 19 ] 肖鹏云,张连翔,李晶东. 倭肯河泥沙特性分析[ J ]. 黑龙江水利科技, 2009, 37(3): 88-89.
- [ 20 ] 范昊明,蔡强国,王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[ J ]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 66-70.
- [ 21 ] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[ J ]. Global and Planetary Change, 2003, 39: 111-126.