

极端强降水变化与泥石流侵蚀输沙特征相关性分析 ——以长江上游小江流域蒋家沟泥石流为例

王裕宜^{1,2}, 詹钱登³, 田冰⁴, 洪勇^{1,2}, 邹仁元²

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院 东川泥石流观测研究站, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041;

3. 台湾成功大学 水利及海洋工程系, 台湾 台南, 70101; 4. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050016)

摘 要: 根据长江上游小江流域蒋家沟泥石流 1965—2007 年的观测资料与会泽气象站 1970—2005 年的日降水资料, 详细分析了泥石流侵蚀输沙特征与极端强降水变化的相关性。分析结果表明, 1990 年以来, 夏季极端强降水和夏季降水量以显著增加为主要特点, M—K 检验表现为显著增加趋势(99%的置信度), 1990—2005 年的夏季平均极端强降水量比 1970—1989 年的夏季平均极端强降水量增加 57.56 mm。该流域这个特点与蒋家沟泥石流在 90 年代出现的侵蚀输沙量的大量增加有相当紧密关系。

关键词: 极端强降水; 泥石流; 侵蚀输沙

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)03—0165—05

中图分类号: P642.23

Relationship Between Eroded Sediment Transport of Debris Flows and Extreme Rainfall —A Case Study of Debris Flow at Jiangjia Ravine of the Xiaojiang River Basin in the Upper Reach of Yangtze River

WANG Yu-yi^{1,2}, ZHAN Qian-deng³, TIAN Bing⁴, HONG Yong^{1,2}, ZOU Ren-yuang²

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;

3. Dept. of Hydraulics & Ocean Engineering, Cheng Kung University, Tai'nan, Taiwan 70101, China;

4. College of Resources & Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: The correlation of extreme rainfall to eroded sediment transport is analyzed in detail based on the data of debris flows observed from 1965 to 2007 in Jiangjia Ravine of Xiaojiang River basin and the daily rainfall data collected from 1970 to 2005 in Huize station in the upper reaches of Yangtze River. Results from the analysis indicate that extreme rainfall events and rainfall amount in summer have a notably increased trend in the region since 1990s and M—K test presents a notably increased trend (confidence interval of 95%). The character has a close relation with the tendency of increased sediment transport in debris flows in the Jiangjia Ravine.

Keywords: extreme rainfall; debris flow; eroded sediment transport

长江上游金沙江一级支流小江流域为我国泥石流灾害发育的典型区域。该区山地自然环境脆弱特殊性,具有孕育泥石流形成发展的基础。而降水则是泥石流形成过程中触变液化、突然暴发的激发因素。降水年际变化的特点,特别是极端天气事件对泥石流灾害暴发的规模和频率,以及我国西部山区社会经济生活都具有重要影响。极端天气事件发生的频率和强度变化对泥石流灾害和人类社会的冲击远大于气候平均变化带来的影响。近年来,因全球气候变

暖而引发极端天气事件不断增加的趋势已经受到各国政府和人民的关注^[1-5]。长江流域是全球气候变化区域响应的重要地区^[3],而长江上游金沙江下游的小江流域降水年内和年际变化更为突出。本文根据所收集到的长江上游小江流域蒋家沟(103°6'—13°E, 26°13'—17°N)泥石流 1965—2007 年的观测资料和蒋家沟形成区附近国家级会泽气象站(103°17' E, 26°36' N, H=2 200 m)的 1970—2005 年日降水资料。分析研究该流域泥石流侵蚀输沙与极端强降水

收稿日期:2008-08-19

修回日期:2008-12-09

资助项目:国家自然科学基金“泥石流土体启动的应力应变特征以及降雨警戒值的研究”(40671026)

作者简介:王裕宜(1944—),女(汉族),上海人,研究员,主要研究方向为泥石流应力应变特性和泥石流预测预报的观测研究。E-mail:wyyyzn@mde.cu.cn。

变化趋势和突变特征的关系。这对于了解小江流域的气候变化背景,分析该流域泥石流灾害在 1990 年呈现高发频率的成因机制和输沙特性,防止山地生态环境退化,进行生态安全策略的构建以及实现该区域山地生态环境优化和社会经济可持续发展都具有重要意义。

1 蒋家沟泥石流侵蚀输沙量变化特征

本项研究区是长江上游金沙江下游右岸小江流域的蒋家沟,它是位于小江下游右岸的一条典型暴雨型泥石流沟。该流域地跨昆明市东川区绿茂乡和会泽县大海乡,流域面积 48.6 km^2 ,该沟的泥石流规模巨大,暴发频繁,危害严重为世界著名的泥石流沟。蒋家沟流域地势东高($H=3\ 269 \text{ m}$)西低($H=1\ 042 \text{ m}$),沟内岩性软弱,断裂纵横,地形陡峻,植被稀少,地表形态十分复杂,滑坡和崩塌活动非常强烈,储有松散固体物质 $1.23 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。流域内有大小支沟 200 余条,一到雨季,滑坡和崩塌纷纷发生,导致泥石流频频暴发。蒋家沟泥石流的观测资料清楚地表明^[6],在 1965—1989 年期间,通常每年泥石流侵蚀输沙量为 $1.00 \times 10^6 \sim 3.00 \times 10^6 \text{ m}^3$,泥石流均输沙量为 $2.15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,丰水年(峰值年)平均也只达到 $3.60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。而在 20 世纪 90 年代泥石流侵蚀输沙量平均为 $3.06 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,丰水年(峰值年)平均可以达到 $6.58 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,平均每年泥石流要多侵蚀输沙 $9.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

上述 1990 年以来出现的泥石流侵蚀输沙量的增加与年降水量、夏季降水量和夏季极端强降水量显著增加趋势都有相当紧密的关系。在一定时段内地形(仅 1965—1999 年,2001 年以后除外)和松散固体物质变化不大的情况下,泥石流对其气候变化(主要是降水)的响应关系极为紧密,是泥石流形成过程中最重要的一个因素。而该区的降水特点,又恰好更有利于泥石流的触变液化作用。

该区降水的特点一是降水基本集中在 5—10 月,其中 6—8 月这 3 个月更为集中,占全年降水量的 50%,也恰好是泥石流暴发的高潮期;二是多雨地带与泥石流形成区吻合一致。降水集中为泥石流形成提供了充分的前期供水条件,加速了泥石流的孕育过程。三是多局地性暴雨。这是在季风气候和地形共同影响下形成的一种控制面积小,历时短,强度大的局地性暴雨(或称点暴雨),它是形成该区泥石流的主要激发因素。该区位于云贵高原北部,乌蒙山脉西缘,属滇东北高山峡谷区。特殊的地理位置,形成了该流域独具特色的气候条件。在雨季(5—10 月),该

流域对流层上空受热带东风带、副热带西风带和西南季风影响^[7]。还由于受青藏高原大地形的影响,一支从孟加拉湾印度洋上来的西南季风气流,与高原北侧的偏北气流形成了一条横贯青藏高原的切变线,当遇到北方冷高压南移,切变线推移到川滇交界处(蒋家沟流域在川滇交界处附近),其附近会产生强对流降水天气^[7-8],就容易产生极端强降水事件。特别是 1990 年以来该区域的夏季极端强降水量事件出现显著增加的趋势。

2 极端强降水阈值的确定和分析方法

2.1 极端强降水阈值的确定

根据我国气象规范规定,日雨量 50 mm 为暴雨。但以此为标准,不仅长江上游会出现较大面积无暴雨区^[1-3],而且也不符合突发性气象事件实际情况。而根据世界气象组织的规定,将 $>90\%$ 分位点(或者 $<10\%$ 分位点)的事件定义为极端事件。这不仅有利于增加少雨和多雨地区强降水变化趋势的空间可比性,而且还大大增加对长江上游广大山区突发性地质灾害评估的可能性。

根据苏布达等^[9]对长江流域 140 个气象站 1960—2004 年降水序列日降水量的趋势分析,将 $>95\%$ 分位点的事件定义为极端降水事件,并认为“长江流域极端强降水阈值自东南向西北逐步减少,降低到长江源头地区的 $>10 \text{ mm/d}$ ”。根据我们在该流域的 1982—1984 年和 1995—1997 年共 72 场泥石流暴发始发日降水量和前期降水量观测资料分析,前期降水量为泥石流暴发始发日前 20 d 的降水量,其计算方法是按 0.8 系数衰减^[10]。

统计值中大约有 10% 泥石流暴发的平均始发日降水量为 8 mm/d ,但这种情况必须要有充分的前期降水量,其泥石流暴发的前期降水量平均值为 46.7 mm ,即始发 + 前期 = 54.7 mm 。结合以上结论,我们将日降水量 10 mm/d 定为该流域极端强降水阈值,相当于会泽气象站 1970—2005 年降水序列日降水量平均统计值的 93.2% 分位点。

2.2 M—K 统计法

蒋家沟流域内山高谷深,地形十分复杂,垂直高差达 $2\ 200 \text{ m}$ 以上,致使垂直气候十分明显。又因为蒋家沟流域的暴雨中心都出现在 $2\ 500 \sim 3\ 000 \text{ m}$ 地带,正好与泥石流形成区同位,所以蒋家沟因雷阵雨激发的泥石流暴发次数约占泥石流暴发总次数的 60% 以上。

我们在蒋家沟小流域内设立的降水观测点,1965—1997 年之间也只有 3 个降水观测点,经常会

因为各种原因造成降水观测资料缺失,缺乏降水观测长时间时序的连续性。

1997 年才补充设有 6 个降水观测点,2006 年以后才可以达到全年自动记录。因为长时间序列气候观测资料来源困难,因此本研究选取云蒋家沟流域上游附近的国家级会泽气象站提供的 1970—2005 年日降水资料为序列气候分析的基本数据。M—K^[11]法是用来评估气候要素时间序列趋势的常用的检验方法之一,以适用范围广,人为性小,定量化程度高而著称,其检验公式为。

$$s = \sum_{i=2}^{n-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

其中 $\text{sign}()$ 为符号函数,当 $x_i - x_j$ 小于、等于或大于零时, $\text{sign}(x_i - x_j)$ 分别为 -1, 0 或者 1; M - K 统计量公式在 s 小于、等于或大于零时 z 为^[8]。

$$z = \begin{cases} (s - 1) / \sqrt{n(n - 1)(2n + 5) / 18} & (s > 0) \\ 0 & (s = 0) \\ (s + 1) / \sqrt{n(n - 1)(2n + 5) / 18} & (s < 0) \end{cases} \quad (2)$$

M—K 统计量公式在 s 小于等于或大于零时, z 值为正值表示增加趋势,负值表示为减少趋势。 z 值在大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时分别表示通过了 90%, 95%, 99% 的置信度显著性检验。M—K 法来检验突变时,当 UF 与 UB 曲线的交点为位于信度线之间,则此交点可能为突变点的开始。然后再配以滑动 t 值检验来检验序列存在的显著性差异。

3 结论与分析

运用 Mann—Kendal (M—K) 非参数检验方法,对会泽气象站提供的 1970—2005 年日降水资料的年极端强降水量和夏季极端强降水量(图 1)进行时间序列的趋势分析和突变检验,其结果见图 2。

3.1 年极端强降水量变化趋势和突变

1970—2005 年日降水量的趋势表明,该地区的年极端强降水量存在明显增加趋势。由原序列(或者称正序列 UF)曲线可知,从 1970 年以来该地区的年极端强降水量有增加趋势,尽管 1974 年以后波动比较大。但是在 90 年代,该地区的年极端强降水出现了显著的增长趋势,其增长趋势 (MK = 3.854) 均超过了 0.05 临界线,即达到了 99% 的置信度。根据正序列(UF)与反序列(UB)曲线的交点,可以确定 36 a 中该地区的年极端强降水量是以 1990 年为突变点(图 2a)。

1970—1989 年的年均极端强降水量为 486.67 mm, 1990—2005 年的年均极端强降水量为 565.42 mm, 后者比前者平均增加 78.95 mm, 即 1990—

2005 年比 1970—1989 年的年均增加 16.22%。滑动 t 值检验 $t = 2.26 > t_a = 2.137$, 达到 95% 的极显著性差异。

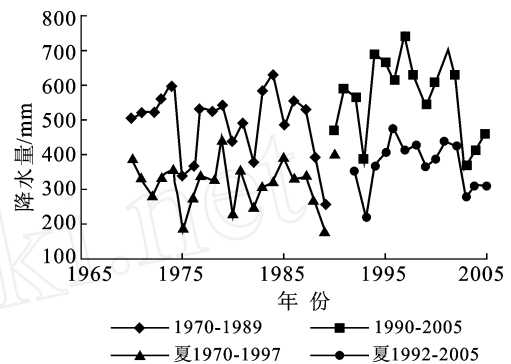


图 1 研究区年极端强降水和夏季极端强降水量

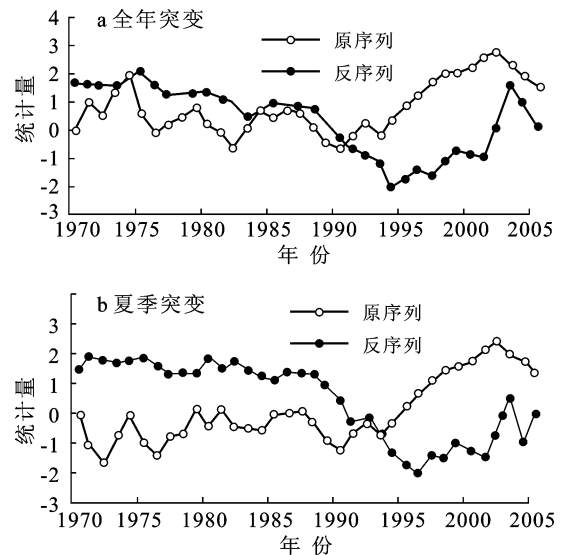


图 2 蒋家沟(会泽)年极端降雨和夏季极端降雨突变检验

3.2 夏季极端强降水量变化趋势和突变

该地区的夏季极端强降水量也同样存在明显增加趋势(MK = 3.501) 即达到了 99% 的置信度。突变检验表明,36 a 中该地区的夏季极端强降水量以 1992 年为突变点(图 2b), 1992 年以后出现了显著性的增长,显著性检验超过 2.56, 达到了 99% 的置信度。1970—1991 年夏季平均极端强降水量为 314.16 mm, 而 1992—2005 年的夏季平均极端强降水量为 371.72 mm, 后者比前者平均增加 57.56 mm, 即 1992—2005 年比 1970—1991 年的年平均增加 18.32%。滑动 t 值检验 $t = 2.52 > t_a = 2.137$, 达到 95% 的极显著性差异。该结论与文献 [12] 的结论一致。

夏季正是泥石流的暴发最集中的季节,夏季极端强降水量的增加对泥石流灾害的暴发频率起着极为重要的作用。

3.3 极端强降水的强度和频率

降水的强度和频率是决定降水总量的两个要素。该地区年极端强降水事件的年平均强度和年降水天数(频率)的趋势分析显示,其增加趋势不明显。若将该地区的年极端强降水事件以 1990 年为突变点,1990—2005 年极端强降水事件年平均强度 21.17 mm/d 和 1970—1989 年(19.95 mm/d)相比,仅仅增加了 1.22 mm/d。极端强降水事件年降水日数(频率)的趋势也只有微弱的增加,1990—2005 年极端强降水事件年均天数(27 d)和 1970—1989 年(24.5 d)相比,也仅增加了 2.5 d。由于该地区极端强降水阈值日降水量 10 mm/d,即相当于日降水量平均统计值的 93.2%分位点,如按极端强降水事件年平均天数为 27 d 计算,因为平均强度增加量为 1.22 mm/d,则由于年平均强度增加带来的年极端强降水增加量约为 32.94 mm。

该地区的夏季极端强降水事件的平均强度和降水天数(频率)的趋势分析显示,夏季极端强降水事件的增加趋势明显,以 1994 年为突变点。1994—2005 年夏季极端强降水事件平均强度(24.2 mm/d)和 1970—1993 年(21.1 mm/d)相比,增加了 3.1 mm/d。夏季极端强降水事件日数(频率)的趋势也只有微弱的增加,1994—2005 年夏季极端强降水事件平均天数(16.17 d)和 1970—1993 年(14.88 d)相比,也仅增加了 1.29 d。因为夏季山区局地强对流降水天气,更容易产生极端强降水事件,所以我们特别就其中的暴雨极端强降水事件进行分析,即 50,40 和 30 mm/d 的暴雨极端强降水事件。1970—1993 年 50,40 和 30 mm/d 的年平均频率(天数),分别为 0.5, 0.67, 1.96 d;而 1994—2005 年的年平均频率(天数),分别 1, 1, 3 d,与 36 a 年夏季降水总量在 99%显著水平上呈现的增加趋势相一致。其中 1970—1993 年期间有 16 个年份没有出现 50 mm/d 的暴雨,而有暴雨(50 mm/d)的年份只占总年数(24 a)的 33%,1994—2005 年期间只有 5 个年份没有 50 mm/d 暴雨,而有暴雨(50 mm/d)的年份占总年数(12 a)的 58%。

从以上分析可知,尽管年极端强降水事件的年平均强度和年降水天数只有微弱的增加,但夏季极端强降水事件的平均强度 1994—2005 年确比 1970—1993 年增加较大。这对于 1994—2005 年期间夏季泥石流的暴发频率和侵蚀输沙量的增加有极为重要的关系。根据蒋家沟泥石流的观测资料,在 1982—1984 年期间,6—8 月暴发的泥石流总侵蚀输沙为 $9.23 \times 10^6 \text{ m}^3$;而在 1995—1997 年期间,6—8 月暴发

的泥石流总侵蚀输沙为 $1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$,后者比前者多侵蚀输沙 $3.85 \times 10^6 \text{ m}^3$,也就是说后者比前者每年的 6—8 月份多侵蚀输沙 $1.28 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

3.4 夏季降水量变化趋势和突变

研究区的夏季降水量也同样存在明显增加趋势,达到了 99%的置信度。突变检验表明,36 a 中该地区的夏季降水量以 1994 年为突变点,1994 年以后出现了显著性的增长,显著性检验超过 2.56,达到了 99%的置信度。1970—1993 年夏季平均降水量为 411 mm,而 1994—2005 年夏季平均降水量为 492.2 mm,后者比前者平均增加 81.2 mm,即 1994—2005 年夏季平均降水量比 1970—1993 年的平均增加 19.76%。夏季降水量与夏季极端强降水量的增加对泥石流灾害的暴发频率和侵蚀输沙量的增加起着极为重要的作用。如蒋家沟 1982—1984 年 3 a 期间共暴发泥石流 29 场^[10],其中在 6—8 月暴发的泥石流就有 28 场占统计数的 96.55%;1995—1997 年 3 a 期间共暴发泥石流 43 场,其中在 6—8 月暴发的泥石流多达 42 场,占统计数的 97.67%。后者比前者在 6—8 月暴发的泥石流增加 14 场,输沙量增加 $3.85 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

4 结论

通过对泥石流灾害典型区长江上游小江流域蒋家沟(会泽)1970—2005 年日降水资料和泥石流灾害暴发频率和规模的分析,初步可以得到以下结论。

(1) 小江流域蒋家沟泥石流的观测资料清楚地表明,在 1965 年到 1989 年期间,泥石流输沙侵蚀量丰水年(峰值年)平均只达到 $3.60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,而在 1990 年以后的丰水年(峰值年)平均可以达到 $6.58 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,后者是前者的近 2 倍。

(2) 根据蒋家沟 1995—1997 年期间和 1982—1984 年泥石流的观测资料分析,1995—1997 年 6—8 月泥石流的侵蚀输沙量比 1982—1984 年 6—8 月暴发泥石流的侵蚀输沙量增加 $3.85 \times 10^6 \text{ m}^3$,每年 6—8 月泥石流的侵蚀输沙量,前者比后者年均增加 $1.28 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

(3) 1970—2005 年日降水资料趋势表明,该地区的年极端强降水量存在明显增加趋势。36 a 中该地区的年极端强降水量是以 1991 年为突变点。该地区的夏季极端强降水量以 1992 年为突变点,1992 年以后出现了显著性的增长,显著性检验超过 1.96,达到了 95%的置信度。

(4) 该地区的夏季极端强降水事件平均强度的趋势分析显示,夏季极端强降水事件平均强度的增加

趋势明显,以1994年为突变点。1994—2005年极端强降水事件夏季平均强度(24.2 mm/d)和1970—1993年(21.1 mm/d)相比,增加了3.1 mm/d。夏季降水量与夏季极端强降水量的增加对泥石流灾害的暴发频率和侵蚀输沙量的增加起着极为重要的作用。

致谢 作者深深地感到本项研究无论是36 a的气象观测资料的获得,还是近46 a泥石流侵蚀输沙量的观测资料的获得,都凝聚着两代人长期野外工作的艰辛。在此作者对国家气象观测站与中国科学院东川泥石流观测研究站的老同仁们表示最诚挚的敬意和感谢。

[参 考 文 献]

- [1] 秦大河,陈振林,罗勇,等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展,2007,3(2):63-72.
- [2] Plummer N, Salinger M J, Nicholis N, et al. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth centuries[J]. J. Climate Change, 1999, 42:183-202.
- [3] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. University Press in U K, 2001:1-785.
- [4] 苏布达,姜彤,施雅风,等. 1990s长江流域降水趋势分析[J]. 湖泊科学,2003,15(增刊):38-48.
- [5] 张小玲,陶诗言,卫捷. 20世纪长江流域3次全流域灾害性洪水事件的气象成因分析[J]. 气候与环境,2006,11(6):669-682.
- [6] 王裕宜,李昌志,洪勇. 暴雨泥石流输沙年际变率的旋回性研究[J]. 自然灾害学报,2000,9(4):36-42.
- [7] 王瑞元,张根娟. 暴雨泥石流预报专家系统研究. 云南省滑坡泥石流重点区域预测预报与评价方法[M]. 昆明:云南科技出版社,1995:3-6.
- [8] 陈景武,汪凯. 长江上游降水特征与泥石流. 泥石流观测与研究[M]. 成都:科学出版社,1996:116-120.
- [9] 苏布达,姜彤,任国玉,等. 长江流域1960—2004年极端强降水时空变化趋势[J]. 气象变化研究进展,2006,2(1):9-13.
- [10] 吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990:197-199.
- [11] Claudia Libiseller. A program of multivariate and partial Mann-Kendall test[OL]. [2002]http://www.mai.liu.se/, 2002.
- [12] 陈辉,施能,王永波. 长江中下游气候的长期变化及基本态特征[J]. 气象科学,2001,21(1):44-53.
- [13] 刘鸿雁,黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2041-2046.
- [14] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994:84-100.
- [15] 北京林学院主编. 数理统计[M]北京:中国林业出版,1980:155-161.
- [16] Acosta-Martinez V, Reicherz, Bisehoff M, et al. The effect of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality[J]. Biol Fert Soils, 1999, 29:55-61.
- [17] Whalley W R, Dumitru E, Dexter A R. Biological effects of soil compaction[J]. Soil Till Res, 1995, 35:53-68.
- [18] 徐艳梅,张健,梁剑. 四种退耕还林(草)模式土壤理化性质动态研究[J]. 四川农业大学学报,2007,25(3):294-299,305.

(上接第112页)

- [8] 王钰,杨少杰. 贵州喀斯特峡谷地区花椒林地土壤物理性质研究[J]. 中国水土保持,2007(11):48-55.
- [9] 杨光,丁国栋,常国梁,等. 黄土高原不同退耕还林地森林植被改良土壤特性研究[J]. 水土保持研究,2006,13(3):204-207,210.
- [10] 梁伟,白翠霞,孙保平,等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林(草)区土壤水分—物理性质研究[J]. 中国水土保持,2006(3):17-18.
- [11] 张力,孙保平. 北京大兴区人工植被恢复过程土壤水分:物理特性变化研究[J]. 水土保持研究,2007,14(4):465-467.
- [12] 王旭琴,戴伟,夏良放,等. 亚热带不同人工林土壤理化性质的研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(6):56-59.