

# 蒋家沟泥石流入汇时小江悬移质输沙特征分析

张金山<sup>1,2</sup>, 屈益<sup>3</sup>, 林伟<sup>1,2</sup>, 张应良<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 陕西省地矿局第六地质队, 西安 710611; 4. 昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650093)

**摘要:**以 2009 年 8 月 4 日蒋家沟的一场泥石流入汇小江后泥沙观测资料为基础, 分析了蒋家沟泥石流入汇小江后的泥沙输移特征。泥石流为小江直接提供了大量的悬移质泥沙, 导致入汇时小江输移的泥沙量剧增, 输沙率达到了平时的 5 倍以上; 部分堆积于入汇口的泥石流固体物质也在泥石流结束后受小江水流冲刷再次起动, 使小江悬移质输沙率在泥石流结束后呈平稳下降, 与蒋家沟呈幂曲线下降形成明显的区别。由于泥石流输入的泥沙中细颗粒更容易被小江水流输移, 因此尽管入汇的泥石流泥沙中粗颗粒含量较高, 但在小江泥沙中含量增加的却是较细的粉沙、黏土颗粒, 小江悬移质的中值粒径与含沙量、输沙率和流量的关系曲线都呈上凸形。

**关键词:**蒋家沟; 泥石流; 小江; 悬移质输沙

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)06-0037-05

## Suspended Load Characteristics of Xiaojiang River in the Scenario of Debris-Flow Afflux from Ravine

ZHANG Jin-shan<sup>1,2</sup>, QU Yi<sup>3</sup>, LIN Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yin-liang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazard and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 3. The No. 6 Geological Team of the Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710611, China; 4. College of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The characteristics of sediment flows in the Xiaojiang River was studied when debris flowed into this river, and the solids transport is systematically investigated. A debris flow occurred on Aug. 14, 2009, in the Jiangjia Ravine was observed and the process of the afflux to the Xiaojiang River was also monitored. With the observation data, the flow of the suspended load in the Xiaojiang River was analyzed after the afflux of debris-flow. Debris flows usually provide a large number of suspended loads for the Xiaojiang River directly, which generally leads to the rapid increment of sediment transport in the river. The sediment transport rate of the suspended loads reached about five times of the normal level. Some of the debris flows deposit at the mouth of the Jiangjia Ravine and enter the Xiaojiang River by erosion. Thus, the suspended load transport rate is observed to decrease steadily rather than the decline like the exponential curve in Jiangjia Ravine. Moreover, fine sediment of the debris-flow is more likely to be transported in the Xiaojiang River. Therefore, the amounts of silts and clays increases with the sediment transport rate faster than that of fine sands. As the result, the relationship curves between the mean particle size, the sediment concentration, the discharge, and the sediment transport rate are found to be convex.

**Key words:** the Jiangjia Ravine; debris-flow; Xiaojiang River; suspended load

泥石流是水土流失的一种剧烈形式, 它从上游将大量风化和重力、水力等各种侵蚀产生的泥沙向下游输送, 具有大容重 ( $1.7 \sim 2.3 \text{ t/m}^3$ ), 高流速 ( $3 \sim 12$

m/s, 有记录者最高可达到  $80 \text{ m/s}$ ), 大流量 (其流量是沟谷正常流水的几十倍到几千倍), 短历时 (几分钟到几十小时) 和宽级配 (粒径量级从  $1 \times 10^{-6} \sim 10 \text{ m}$ )

等特征<sup>[1-2]</sup>。不仅对泥石流沟谷产生剧烈的冲淤,而且剧烈改造与主河交汇入口的河床演变,对主河水流及其挟沙能力的时间与空间分布产生巨大影响。大量泥沙进入河道,对长江泥沙、水文特征、河道演化等产生严重影响,危及水利水电工程的建设和运行安全,并危害江河防洪和航运安全<sup>[3]</sup>。

泥石流泥沙入汇对主河演变的影响近年来有了一些深入的研究。赵席文<sup>[4]</sup>介绍了小江流域泥石流的输沙情况,并定性分析了泥石流输沙与河床演变的关系。Cui P<sup>[5]</sup>首次分析了金沙江下游的河床演变与泥石流输沙的关系。游勇分析了小江流域泥石流输沙对小江中下游河床演变的影响<sup>[6]</sup>,何易平<sup>[7]</sup>通过实验和野外观测,对泥石流入汇主河的模式、河道响应进行定性和半定量的研究,并提出了一些泥石流堵河的判别式。崔鹏<sup>[8-9]</sup>在连续观测资料的基础上,对泥石流输沙的强度、级配和时空分布特征进行了研究。但泥石流进入主河后的泥沙输移的定量观测研究还没有展开,无法定量评估泥石流入汇对主河输沙特征的影响。

本文以 2009 年 8 月 4 日蒋家沟泥石流入汇小江的观测资料为基础,对泥石流入汇后小江泥沙特征进行分析,以掌握主河输移泥石流物质的特征与规律。因推移质泥沙观测困难,加之泥石流区为砾石河床,虽经过了尝试,但没有取得有效的推移质样品,所以本文的分析只针对悬移质泥沙。

## 1 研究方法

### 1.1 蒋家沟泥石流入汇小江后输沙观测方法

为准确反映蒋家沟泥石流输沙对小江泥沙的贡献量,在小江的蒋家沟入汇口上下游分别选择观测断面。观测断面选择在河道较平直的水流平稳区域,而且要有较好的观测条件,最终选择的观测断面位置如图 1 所示。



图 1 小江水文观测点设置略图

观测断面 AA' 处至蒋家沟入汇口距离为 3.2 km, 中间无支流汇入, 可以代表蒋家沟入汇前的泥沙特征。但此处受下游泥石流入汇的影响, 小江河床变

化幅度大<sup>[6]</sup>, 单纯的水位测量无法得到小江的真实情况, 所以必须测量过流断面, 该断面处恰好有横跨小江的公路桥, 可以在桥上使用铅锤法测量小江的过流断面。断面 AA' 处的观测项目有: 过流断面、流速、悬移质采样。

BB' 断面处小江为游荡型河床, 主流不固定, 改道频繁, 水流湍急。此处的观测项目为流速和悬移质采样, 流量为上游 AA' 断面流量及蒋家沟和达朵沟流量之和。蒋家沟汇口至观测断面 BB' 间距离为 2.2 km, 中间还有达朵沟汇入, 为消除达朵入汇水量和泥沙的影响, 对达朵沟进行了流量和泥沙的测量, 观测点位于 C 点。

观测断面 AA' 至 BB' 距离为 5.4 km, 根据实际流速测量, 水流从 AA' 到达 BB' 约需要 30 min, 实际观测时 BB' 比 AA' 推迟 30 min 进行, 但在数据中都以 AA' 测量时间表示。

在蒋家沟没有暴发泥石流的情况下, 观测频率为每周一次, 有较大洪水时加测。蒋家沟暴发泥石流时, 观测频率调整为每小时一次。用水样分析小江含沙量并据此计算小江的悬移质输沙率和输沙量, 并用马尔文激光粒度仪进行悬移质泥沙样品的颗粒分析。

### 1.2 2009 年 8 月 4 日蒋家沟泥石流观测

据设置在蒋家沟泥石流观测站的降雨监测点记录, 2009 年 8 月 4 日凌晨 3:00—9:00 共降雨 43 mm, 并引发泥石流。泥石流于 5:30 左右到达观测站, 阵性泥石流持续至 7:30 后转变为连续流。6:00 天亮后观测人员对泥石流的流速、泥深、流宽等进行观测, 并采样分析泥石流容重与含沙量, 因小江水文观测从 7:00 开始, 根据阵性流流速推算, 7:00 以后汇入小江的阵性泥石流是 6:30 以后通过东川站观测断面的, 蒋家沟泥石流的观测数据统计也从 6:30 开始。

### 1.3 2009 年 8 月 4 日小江水文观测

小江水文观测小组于 6:30 到达观测断面开始工作, 首先测量 AA' 断面处小江水流的过流断面, 然后两个断面约定同时于整点时按事先设计好的观测方案进行量测和采样(开始测量时泥石流已汇入主河), 从上午 7:00 一直持续到下午 16:00, 观测到入汇口下游小江含沙量由升高至最高点至衰减的基本完整过程。

## 2 结果与分析

### 2.1 泥石流物质进入小江后悬移质输沙量

根据小江观测断面的样品颗粒级配分析结果, 小江中悬移质的中值粒径( $d_{0.5}$ )为 0.007 mm 左右, 泥

石流入汇后的 BB' 断面悬移质的中值粒径稍大,但区别不大,两断面处样品的最大粒径为 0.25 mm,考虑到所采样品为表面水流,泥沙最大颗粒较下层小,再结合实验中悬移质最大粒径数据,选择 0.25 mm 为可以被主河悬移质带走的最大粒径。

2.1.1 泥石流物质进入小江后悬移质输沙总量 比较蒋家沟入汇口上下游小江水流的输沙率(图 2)可以看出,由于泥石流的入汇,入汇口下游小江输沙率达到了平时的 5 倍以上。位于入汇口上游的 AA' 处输沙率基本稳定, BB' 断面处的悬移质输沙率则从 8:00 开始出现大幅度下降,并在 16:00 降到与上游断面基本相同。根据小江水文泥沙观测资料的分析可知,在泥石流入汇时上下游输沙量的差别可以认为是由于蒋家沟的入汇而造成的。观测站处后续流开始于 7:30,流速 1.5~1.9 m/s,到达 4.55 km 处的入汇口需耗时 40~50 min,再由入汇口到达 2.2 km 处小江下游观测断面约需 12 min,因此与蒋家沟 7:30 的连续流所对应的是小江 8:30 左右的输沙。计算出小江在 7:00—16:00 时共输送 <0.25 mm 的泥沙约 6.6 万 t,相应时段(6:30—15:00)蒋家沟输入相同粒级的泥沙约 4.5 万 t,两者之间的差值为 2.1 万 t,说明在此过程中小江的两个观测断面间有新的泥沙来源,也说明这时小江的挟沙力大于上游及蒋家沟的来沙量。

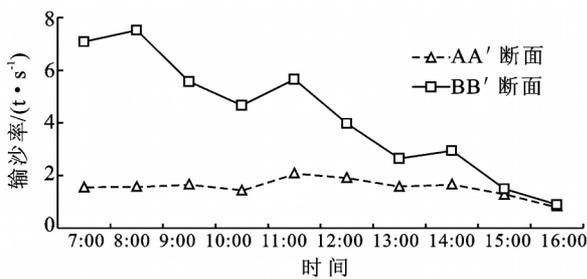


图 2 泥石流入汇时蒋家沟入汇口上、下游输沙率

2.1.2 泥石流物质进入后小江悬移质输沙过程 计算出 AA' 和 BB' 处输沙率的差值并点绘其与时间的散点图发现,小江在蒋家沟泥石流结束后其悬移质输沙率呈斜线下降,也就是说其下降表现出一定的均匀性(图 3)。而阵性泥石流结束后蒋家沟输沙率的下降趋势为先迅速后平稳的乘幂曲线衰减,悬移质粒级的泥沙输沙率在阵性流之后的衰减也同样呈乘幂曲线(图 4)。主河的泥沙衰减也本应与蒋家沟入汇的泥沙随时间变化趋势一致,呈乘幂曲线衰减。实际观测到的这种呈均匀变化过程的现象说明在此过程中有新的泥沙输入使衰减的速度才没有如乘幂曲线一样迅速。

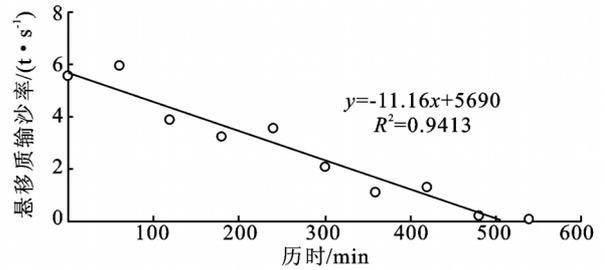


图 3 2009 年 8 月 4 日 BB' 断面悬移质泥沙的输沙率

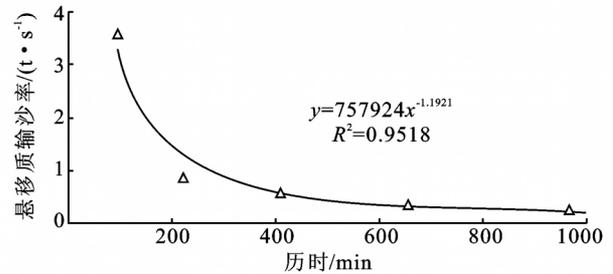


图 4 蒋家沟后续流输沙率 (<0.25 mm 颗粒)

这个新的泥沙来源就是堆积于蒋家沟入汇口处的泥石流物质受到小江水流冲刷再次起动的泥沙。在阵性流期间,泥石流大量地堆积于入汇口附近的小江河床中,引起小江河床的抬升,对上游来水产生壅塞甚至堵断小江。随着阵性流输沙的减弱或结束,小江水流在堆积体上冲刷形成新的河道,并且深度不断加大,最后达到稳定。在河道冲刷下切加深的过程中堆积下来的泥石流物质被不断的向下游输送。

根据地形断面测量,小江最后冲刷形成的断面最深为 4.5 m,河宽约 60 m,算得断面面积为 283 m²,在河道中的延伸长度约为 500 m,冲刷体积约为 14.1 万 m³,以堆积物密度 2.6 t/m³ 计,共输移泥沙 36.7 万 t。若阵性流阶段沟口泥石流为整体堆积,则其颗粒级配应与蒋家沟阵性流的一致。实际上在阵性流与主河水流交汇的过程中,二者有一定程度的掺混,泥石流所携带的细粒物质有一部分在入汇时就被主河带走,使沟口堆积物中细粒物质含量下降,而主河下切的位置又在堆积区的前缘,这里泥石流堆积时与主河掺混更加强烈,堆积物中的细粒含量更少,采样分析 <0.25 mm 的颗粒含量约为 8% 左右,算得新启动泥沙中 <0.25 mm 粒级的泥沙总量约 2.9 万 t,与通过入汇与输移观测数据的差值基本一致。

## 2.2 蒋家沟入汇后小江悬移质泥沙颗粒特征

泥石流的入汇为主河提供了大量的固体物质,必然使主河河水中泥沙的多少和泥沙的粒径造成影响,而且在泥石流及其后的含沙水流入汇过程中含沙量和颗粒特征呈现出一定的变化规律。

2.2.1 悬移质泥沙粒级分布特征 总体上泥石流浆体、蒋家沟挟沙水流及小江水样泥沙颗粒分布比较相

似,按我国水文工程界的分类<sup>[10]</sup>,小江泥沙主要集中在粒径介于 0.005~0.1 mm 之间的粉沙段,其次为粒径<0.005 mm 的黏粒,两者加起来达到 90%左右,粒径>0.25 mm 的沙粒比例很小。

但各种流体的泥沙级配也有一些区别,蒋家沟挟沙水流中的粉沙段比例较其它曲线都高,而细砂部分的比例则明显较少,甚至较小江挟沙水流小。这是因为后续流泥沙来源充足,黏粒和粉沙较易起动和搬运,所占比例相对较大。与小江水流泥沙相比,泥石流浆体在黏粒与粉沙段都极为相似,区别在于细砂的含量较高,这是泥石流输沙的典型特征,即泥石大小混杂,分选性差,尽管这里只选取了在泥石流流体中充当浆体的<0.25 mm 的泥沙,但颗粒大小混杂的特征仍然存在(图 5)。

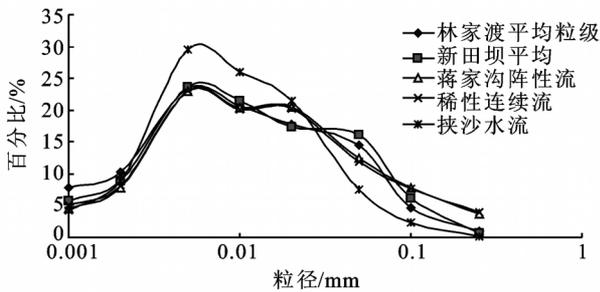


图 5 小江及蒋家沟泥沙<0.25 mm 部分分布曲线

2.2.2 同粒径悬移质输沙率 泥石流为小江水流提供了泥沙物质,使得泥石流入汇期间下游 BB'断面处的水样含沙量远大于上游 AA'断面,也导致小江输沙量大幅增加。除了数量上的增加以外,泥石流输沙率也呈现出一定的规律。从输沙率与流量的散点图来看(图 6),上游的 AA'断面处输沙率与流量关系的点子分布散乱,输沙率与流量的增加没有明显关系,相关系数只有 0.47,这说明因上游来沙量少并且河床物质不易起动,实际输沙率小于水流的最大输沙率,这时的输沙率主要决定于来沙条件;而下游 BB'断面处的输沙率则随着流量的增加而增大,具有明显的相关性,相关系数达 0.92,直线拟合的决定系数

$R^2$  也达 0.84,说明下游的 BB'断面则因蒋家沟泥石流的入汇使来沙量充足,河水含沙量达到饱和,水流输沙能力已致极限,输沙率的大小决定于水流的输沙能力。

从不同粒级的输沙率来看,下游 BB'断面处粉沙和黏粒都随着流量的增加而增加,其中粉沙的增加幅度更大,细砂的输沙率则随流量增加的趋势不明显(图 7),而泥石流(包括阵性流和稀性流)中细砂比例是较高的。说明输沙量的增加并不与来沙颗粒级配完全一致,而是有一定的选择性,水流选择了更易于悬浮而不易下沉的泥沙<sup>[11]</sup>。

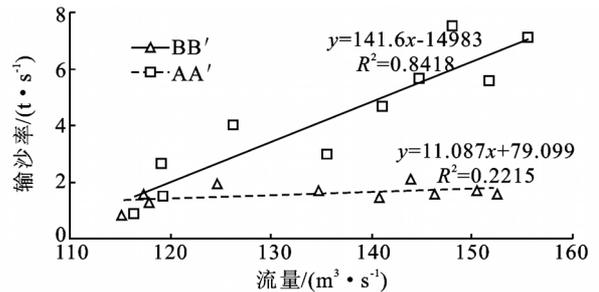


图 6 蒋家沟泥石流入汇时上下游小江流量与输沙率关系

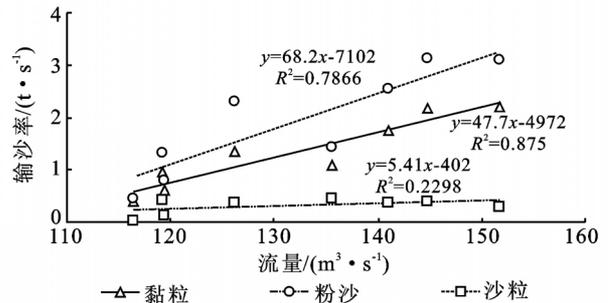


图 7 BB'断面处各粒级泥沙输沙率与流量的关系

小江水流的这种选择性输沙对所输移的泥沙颗粒产生的最明显的影响表现在中值粒径上。根据蒋家沟泥石流入汇后的小江泥沙实测资料, BB'断面处的泥沙中径在与含沙量、输沙率及流量的关系曲线上都表现为先升后降的上凸形曲线(图 8)

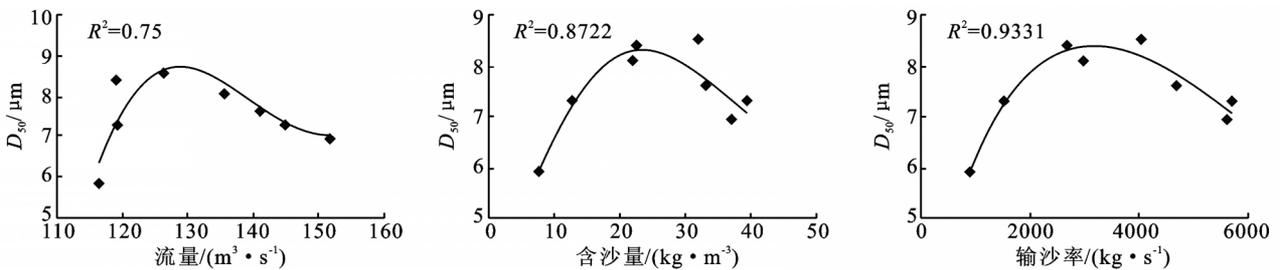


图 8 泥石流入汇后小江泥沙中径与流量、含沙量及输沙率关系

### 3 结论

通过蒋家沟入汇口上下游设置的水文断面及

2009年8月4日的蒋家沟泥石流的观测资料,对蒋家沟泥石流入汇后泥沙在小江中的输移特征进行了初步分析研究,得到以下结论:

(1)由于泥石流向主河输入大量泥沙,入汇口上下游输沙量差别很大,下游的输沙率可达到上游输沙量的5倍,输沙量大大增加。在泥石流阵性流结束后主河输沙率开始下降,但由于同时有堆积于河床上的泥沙起动,下降的过程较为平稳。

(2)蒋家沟入汇小江的泥石流泥沙中粒径 $<0.25$  mm的部分可以以悬移质方式向下游输移,粗颗粒含量较高,由于小江水流的选择性输沙,颗粒较细的粉沙、黏土颗粒更容易被小江水流输移。

致谢:中国科学院东川泥石流观测研究站提供了部分观测资料,在此表示诚挚的谢意。

#### 参考文献:

- [1] 田连权,吴积善,康志成,等. 泥石流侵蚀搬运与堆积[M]. 成都:成都地图出版社,1993.
- [2] 杨美卿,王立新. 泥石流运动的层移质模型及其试验研究[J]. 泥沙研究,1992(3):21-29.
- [3] 崔鹏. 泥石流输沙与长江洪水[C]//长江流域洪涝灾害成因和对策研讨会. 武汉,1999.
- [4] 赵席文. 小江流域泥石流输沙及河床演变[C]//全国泥石流防治与经验交流会. 北京:科学技术文献出版社,1983.
- [5] Cui P. Sediment transported by debris flow to the lower Jinsha River[J]. International Journal of Sediment Research,1999,14(4):67-71.
- [6] 游勇,程尊兰. 泥石流输沙对小江中下游河床演变的影响[J]. 灾害学,2003,18(2):7-11.
- [7] 何易平. 泥石流对山区河流河床演变的影响[D]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,2003.
- [8] Cui P, He Y P, Cheng B, et al. Debris-flow transportation and its effects on fluvial process[C]//Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation. Hubei Yichang, 2004:440-452
- [9] 崔鹏,何易平,陈杰. 泥石流输沙及其对山区河道的影响[J]. 山地学报,2006,24(5):539-549.
- [10] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [11] 乐培九. 关于非均匀沙悬移质不平衡输沙问题[J]. 水道港口,1996(4):1-8.
- [25] 赵广东,王兵,杨晶,等. LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统及其应用[J]. 气象科技,2005,33(4):363-366.
- [26] Jared L D, Aslko M, Steve G M, et al. Phenophases alter the soil respiration-temperature relationship in an oak-dominated forest[J]. Int. J. Biometeorol, 2006, 51:135-144.
- [27] Ma S, Chen J, Butnor J R, et al. Biophysical controls on soil respiration in dominant patch types of an old-growth mixed conifer forests[J]. For. Sci., 2005, 51: 221-232.
- [28] Curiel-Yuste J C, Janssens A, Carrara A, et al. Annual  $Q_{10}$  of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. Global Change Biol., 2004, 10:161-169.
- [29] 张东秋,石培礼,张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(7):778-785.
- [30] 李明峰,董云社,齐玉春,等. 锡林河流域羊草群落春季  $CO_2$  排放日变化特征分析[J]. 中国草地,2003,25(3): 9-14.
- [31] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2003,27(2):202-209.
- [32] Bridge B J. The formation of degraded areas in the dry savanna woodlands of northern Australia[J]. Aust. J. Soil Res., 1983,21:91-104.
- [33] Mathes K. The soil respiration during secondary succession;influence of temperature and moisture[J]. Soil Biol. Biochem,1985,17(2):205-211.
- [34] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44B:81-89.
- [35] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995,9:23-36.

(上接第36页)