

# 官坝河泥石流流动力学特征参数

李俊<sup>1</sup>, 陈宁生<sup>2</sup>

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;

2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘 要:**青藏高原东南缘构造断陷湖都不同程度地受到山洪和泥石流侵蚀带来的泥沙淤积的影响。其中邛海的泥沙淤积问题最具代表性。邛海日益严峻的泥沙淤积问题的解决取决于流域内山洪和泥石流的治理。在此背景下, 分析了邛海流域官坝河地形地貌特点和邛海泥沙淤积特征, 并计算了官坝河泥石流流动力学特征参数。研究发现, 官坝河流域泥石流属于过渡性—黏性泥石流, 1998 年官坝河泥石流最大洪峰流量为  $813.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , 泥石流最大动压力和大石块冲击力分别为  $147 \text{ kPa}$  和  $1.63 \times 10^5 \text{ kN}$ 。据此提出了邛海流域官坝河泥石流防治建议: 在官坝河上游支沟采用稳拦防治措施以稳固沟床和拦挡大颗粒物质; 在官坝河下游采用拦排清防治措施以减少细颗粒物质进入邛海并定时清理河床泥沙。邛海流域官坝河泥石流的治理可为青藏高原东南缘构造断陷湖区域内的山洪和泥石流治理提供一定的参考价值。

**关键词:** 青藏高原东南缘; 构造断陷湖; 邛海; 动力学特征参数; 防治工程

**中图分类号:** P642.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2013)01-0264-05

## Dynamics Parameters of Debris Flows in Guanba River

LI Jun<sup>1</sup>, CHEN Ning-sheng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, 610041, China)

**Abstract:** The fault lakes around belt of southeast Tibet were influenced by the sediment deposition coming from the erosion of flash flood and debris flows, in which the example was Qionghai. But the problem that sediment severely deposited in Qionghai relied on the prevention and control of flashflood and debris flows. Under this background, the topography of Qionghai drainage and the character of sediment deposition were analyzed, and the dynamics parameters of debris flows were calculated. The debris flows of Guanba river was transitional viscous. The peak discharge of debris flows was  $813.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , and the highest dynamic pressure and impact force of massive stone was  $147 \text{ kPa}$ ,  $1.63 \times 10^5 \text{ kN}$ , respectively. Above of all, the prevention and control for debris flows was made. Stabilizing slopes of gully and blocking large particles in higher reaches area of Guanba river, reducing fine particles and desilting sediment in lower reaches area of Guanba river should be practiced. This work was useful for prevention and control of debris flows in other fault lakes around belt of southeast Tibet.

**Key words:** belt of southeast Tibet; fault lakes; Qionghai; dynamics parameters; prevention and control project

25 万  $\text{km}^2$  的青藏高原东南缘内发育有 11 个构造断陷湖<sup>[1]</sup>, 这些构造断陷湖都不同程度地受到泥石流侵蚀带来的泥沙淤积的影响。滇池、泸沽湖、洱海、邛海均地处构造活跃区, 地震频繁, 人为生态破坏严重, 使得这些区域的山洪和泥石流发育<sup>[2-9]</sup>。山洪和泥石流携带大量的泥沙进入湖泊, 使其呈现严重萎缩

的趋势。目前人们已经认识到仅修建河堤或排导槽并不能解决青藏高原东南缘湖泊的泥沙淤积问题, 还必须进行有效的工程治理。青藏高原东南缘众多的高原构造断陷湖中, 邛海的泥沙淤积问题最具有代表性。日益严峻的泥沙淤积使邛海面临着生死存亡的忧患<sup>[10-11]</sup>。据调查, 西昌市邛海北岸的官坝河平均每

年流入邛海泥沙量为 15 万 m<sup>3</sup>,并且泥沙每年平均向邛海推进的距离为 55 m。同时,邛海南岸的鹅掌河将大量泥沙带入邛海<sup>[12]</sup>,鹅掌河输入邛海的泥沙有 4.96 万 m<sup>3</sup>,并且泥沙每年平均向邛海推进距离为 2 m<sup>[6]</sup>。因此,本文通过总结国内外泥石流防治工程的研究现状<sup>[13]</sup>,选取治理难度较大的典型泥石流防治工程,如邛海官坝河泥石流防治工程,采用合理的方法计算其泥石流流动力学特征参数,并给出官坝河泥石流防治建议。以期为治理青藏高原东南缘构造断陷湖区域内的山洪和泥石流提供参考。

## 1 官坝河流域概况

官坝河系邛海的一级支流,位于西昌市川兴镇东北方,属青藏高原东南部螺髻山系,东连昭觉县,北接喜德县,西与著名的泸山风景区遥相对应。早更新世末,沿川滇菱形断块的东侧边界断裂曾发生强烈的拉

张性断陷活动,并在西昌附近形成了一个北北西向的地堑地垒系,其中有大兴单断同生断陷盆地<sup>[14]</sup>,受川滇南北向构造作用影响,官坝河流域地形地貌较为复杂。海拔 2 700 m 以上区域主要为中高山剥蚀地貌,约占流域总面积的 27.7%;海拔高程为 1 700~2 700 m 区域主要为深切峡谷,约占流域总面积的 59.9%,沟道多呈“V”字型,滑坡、崩塌和坡面泥石流发育;海拔高程 1 500~1 700 m 地带断陷盆地发育。经过现场调查,推测张巴寺河上游处可能有一断层,走向呈北西—南东向,倾角 50°左右,该断层经过地区岩体破碎,崩塌滑坡发育,为泥石流的发生提供了大量物源。官坝河基本情况见表 1。

官坝河物源丰富,总物源为 1.2×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,物源动储量为 1.16×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>。动物源主要集中于张巴寺河上游。官坝河流域上游裸地区产生了大量的细颗粒,经分析认为这些细颗粒以山洪泥石流方式进入邛海。

表 1 官坝河基本参数

| 流域  | 面积/<br>km <sup>2</sup> | 主沟长/<br>km | 主沟纵<br>比降/‰ | 年平均降<br>雨量/mm | 流域最高<br>海拔/m | 邛海海拔/<br>m | 平均温<br>度/℃ |
|-----|------------------------|------------|-------------|---------------|--------------|------------|------------|
| 官坝河 | 137.24                 | 24.1       | 64.4        | 1013.5        | 3264         | 1510       | 16.9       |

## 2 官坝河泥石流活动特征和邛海泥沙淤积特征

### 2.1 1998 年官坝河泥石流特征值参数

2.1.1 容重 2010 年 5 月调查了官坝河流域的泥石流历史活动(表 2)。通过调查,发现三处明显的

1998-07-06 官坝河泥石流洪痕,分别为 1—1′,2—2′,3—3′断面。但由于后期水流改造,难以采集到泥石流原样,根据现场颗分实验结果(图 1),采用基于黏粒含量的泥石流容重计算方法<sup>[15]</sup>和根据泥石流沉积物计算泥石流容重计算方法<sup>[16]</sup>,取这两种计算结果的平均值作为官坝河泥石流容重值。

表 2 官坝河泥石流历史活动情况和容重

| 流域   | 泥石流时间                   | 类型    | 受灾情况                             | 断面   | 方法① <sup>[15]</sup> | 方法② <sup>[16]</sup> | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|------|-------------------------|-------|----------------------------------|------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| 官坝河  | 1998 年 7 月 6<br>日下午 4 点 | 稀性—黏性 | 沿沟道小营、建新村、焦家村受灾严重,主要是果树和耕地,无人员伤亡 | 1—1′ | 1.55                | 1.69                | 1.62                         |
|      |                         |       |                                  | 2—2′ | 1.62                | 1.76                | 1.69                         |
|      |                         |       |                                  | 3—3′ | 2.53                | 2.12                | 2.33                         |
|      |                         |       |                                  | 7—7′ | 1.67                | 1.51                | 1.59                         |
| 麻鸡窝河 | 1998 年和 2008 年          | 黏性    | 没有造成人员伤亡                         | 4—4′ | 1.71                | 1.87                | 1.79                         |
| 新仁寺河 | 1996 年和 1998 年          | 黏性    | 冲走 1 人,冲毁耕地                      | 5—5′ | 1.90                | 1.95                | 1.93                         |
| 大萝卜沟 | 1998 年                  | 稀性    | 冲死 1 人,淹没耕地                      | 6—6′ | 1.57                | 1.72                | 1.65                         |

计算结果表明,张巴寺河沿程容重逐渐降低,泥石流浆体运动至断面 2—2′处以后,容重值由 2.33 g/cm<sup>3</sup>降低至 1.69 g/cm<sup>3</sup>,官坝河泥石流由黏性过渡到稀性。官坝河其他支流如麻鸡窝河和新仁寺河容重值分别为 1.79 g/cm<sup>3</sup>和 1.93 g/cm<sup>3</sup>,属于过渡性泥石流,而大萝卜沟泥石流容重值为 1.65 g/cm<sup>3</sup>,属于稀性泥石流。官坝河流域泥石流总体属于过渡性—黏性泥石流<sup>[17]</sup>。

2.1.2 流量 采用雨洪法<sup>[18]</sup>计算各断面处的泥石

流洪峰流量(表 3),然后用泥石流形态调查法<sup>[18]</sup>进行校核(表 4)。

计算结果表明,雨洪法和形态调查法计算的泥石流峰值流量较为接近,官坝河泥石流的最大的洪峰流量出现在 1—1′断面处为 813.7 m<sup>3</sup>/s,比断面 7—7′的泥石流洪峰流量大。分析认为,由于 1—1′断面以下的河流为宽浅泥石流滩地,冲出出山口后断面逐渐展宽,泥石流流速降低,泥石流浆体沿程停淤,最后导致泥石流在入海口处流量降低。

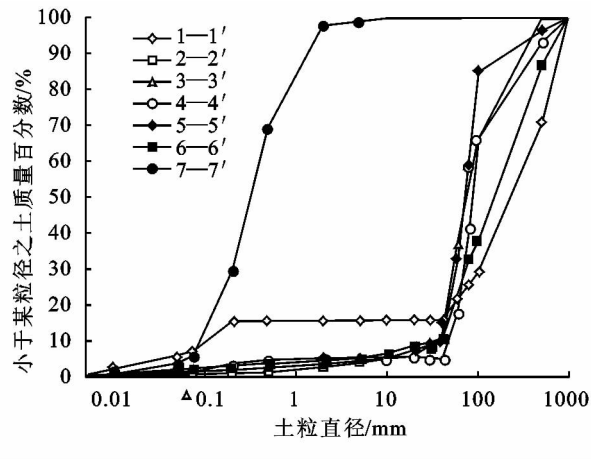


图 1 官坝河各断面处沉积物颗分曲线

2.1.3 一次泥石流固体物质总量 目前国内外还没

有好的方法计算泥石流固体总量,因此采用泥石流五边形法<sup>[18]</sup>,粗略计算了 1998 年 7 月 6 日官坝河断面 7—7'处一次泥石流固体物质总量(表 5)。

通过大量的实地走访,确认 1998 年 7 月 6 日官坝河泥石流为百年一遇的泥石流。计算结果表明,1998 年 7 月 6 日官坝河入海口处一次泥石流固体物质总量 46.4 万 m<sup>3</sup>,另外通过现场实地调查,官坝河入海口处 1998 年泥石流堆积物为 69.0 万 m<sup>3</sup>,故可判断剩余 22.6 万 m<sup>3</sup> 泥石流体来源于同年的其他小规模山洪泥石流和常流水期间被水流所携带的悬移质。说明 1998 年官坝河进入邛海的泥沙以山洪泥石流方式运移的泥沙总量最大,因此官坝河泥石流的工程治理对减少邛海泥沙淤积问题具有重要意义。

表 3 雨洪法计算的泥石流洪峰流量

| 断面   | 集水面积/<br>km <sup>2</sup> | 长度/<br>km | 平均坡度<br>/‰ | $Q_B$ /<br>(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $D_U$ | $Q_C$ /<br>(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|------|--------------------------|-----------|------------|---|------------------------------|-------|---|
| 1—1' | 106.64                   | 16.42     | 73.1       | 497.0   | 1.62                         | 1.2   | 813.7   |
| 2—2' | 28.25                    | 7.83      | 94.2       | 175.4   | 1.69                         | 1.2   | 296.3   |
| 3—3' | 5.60                     | 3.13      | 228.5      | 37.5  | 2.33                         | 1.2   | 80.1  |
| 4—4' | 15.59                    | 7.75      | 118.7      | 60.9  | 1.79                         | 1.2   | 107.0   |
| 5—5' | 16.35                    | 7.23      | 130.0      | 60.2  | 1.93                         | 1.2   | 111.6   |
| 6—6' | 4.41                     | 2.43      | 292.5      | 20.1  | 1.65                         | 1.2   | 33.2  |
| 7—7' | 137.24                   | 24.10     | 64.4       | 484.6   | 1.59                         | 1.1   | 755.1   |

表 4 形态调查法计算的泥石流洪峰流量

| 断面   | 性质 | R/<br>m | $i$  | $M_C$ | $\alpha$ | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | A/<br>m <sup>2</sup> | Q/<br>(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|------|----|---------|------|-------|----------|------------------------------|----------------------|--|
| 1—1' | 稀性 | 5.2     | 0.05 | 15    | 1.8      | 1.62                         | 145.8                | 811.1                                    |
| 2—2' | 稀性 | 3.6     | 0.07 | 13    | 1.0      | 1.69                         | 36.0                 | 290.8                                    |
| 3—3' | 黏性 | 1.8     | 0.11 | 13    | 1.0      | 2.33                         | 12.6                 | 80.4                                     |
| 4—4' | 黏性 | 1.4     | 0.11 | 15    | 1.6      | 1.80                         | 28.0                 | 109.0                                    |
| 5—5' | 黏性 | 1.2     | 0.07 | 13    | 1.1      | 1.93                         | 30.0                 | 105.9                                    |
| 6—6' | 稀性 | 1.4     | 0.09 | 17.5  | 1.4      | 1.65                         | 9.8                  | 45.1                                     |

表 5 官坝河泥石流断面 7—7'的一次泥石流总量和一次泥石流固体物质总量

| 频率/<br>% | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 时间/<br>s | 峰值流量/<br>m <sup>3</sup> | 一次泥石流总量/<br>万 m <sup>3</sup> | 一次泥石流固体<br>物质总量/万 m <sup>3</sup> |
|----------|------------------------------|----------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1        | 1.59                         | 7200     | 755.08                  | 133.7                        | 46.4                             |
| 2        | 1.51                         | 7200     | 636.99                  | 112.8                        | 33.8                             |
| 5        | 1.39                         | 7200     | 508.27                  | 90.0                         | 20.7                             |
| 10       | 1.31                         | 7200     | 425.07                  | 75.3                         | 13.7                             |

2.2 1952—2003 年邛海泥沙淤积特征

据调查与测量,邛海水面面积从 1952 年的 31 km<sup>2</sup> 减少到 2003 年的 27.4 km<sup>2</sup>,按 50 a 计算,则邛海平均每年约减少 7.2 万 m<sup>2</sup>,50 a 邛海面积萎缩 11.6%。邛海的库容由 1952 年的 3.2 亿 m<sup>3</sup> 减少到 2003 年的 2.93 亿 m<sup>3</sup>(表 6),最大水深和平均水深也由原来的 34.0 m 和 14.0 m 降低至 2003 年的 18.32 m 和 10.95 m<sup>[12]</sup>。

表 6 邛海典型年份淤积变化

| 年份   | 最大面积/<br>km <sup>2</sup> | 蓄水量/<br>(×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | 最大水<br>深/m | 平均水<br>深/m |
|------|--------------------------|--|------------|------------|
| 1952 | 31.00                    | 320.00                                     | 34.00      | 14.00      |
| 2003 | 27.41                    | 293.00                                     | 18.32      | 10.95      |

据表 6,邛海面积和库容变化率为 0.16%,水深和平均水深变化率分别为 0.9% 和 0.43%,面积、库容和水深变化都说明邛海正在不断地萎缩,按此变化率计算,则邛海的寿命将只有 600 a 左右。

据调查,2010 年的邛海面积为 27 km<sup>2</sup>,泥沙淤积现状严重(图 2)。2003—2010 年,邛海水面面积平均每年约减少 5 万 m<sup>2</sup>,8 a 内邛海水面面积萎缩了 1.45%。近年来邛海流域在小箐沟、鹅掌河实施的水土保持工程对入海泥沙起到了一定的控制作用,其他未进行工程治理的流域依然十分严重。2008—2009 年官坝河河口泥沙推进 90 m,高仓河河口泥沙前进 20 m。通过对邛海 1952—2003 年泥沙淤积特征的分析 and 官坝河 98 年百年一遇泥石流的动力学特征参数计算结果可知,仅通过修建河堤或排导槽并不能解决

邛海的泥沙淤积问题,还须依赖于有效的工程治理。

2.3 官坝河泥石流流动压力和冲击力

依据舟曲泥石流的大石块冲击力计算实例<sup>[19]</sup>,基于 1998 年 7 月 6 日官坝河泥石流流动压力和大石块冲击力,分别采用铁二院公式<sup>[20]</sup>和基于弹塑性理论的泥石流大石块冲击力计算方法<sup>[21]</sup>(表 7),计算拟建混凝土拦砂坝的动压力和大石块冲击力。现场调查 1998 年官坝河泥石流最大石块直径为 6 m。官坝河沟道堆积大石块岩石类型为红砂岩,大石块密度取 2.31 g/cm<sup>3</sup>。



图 2 2010 年官坝河入海口处泥沙现状  
表 7 官坝河泥石流流动压力和大石块冲击力

| 断面   | 容重/<br>(g · cm <sup>-3</sup> ) | 流速/<br>(m · s <sup>-1</sup> ) | 大石块直<br>径/m | <i>C,n</i>              | 建筑物形状<br>系数(λ) | 动压力/<br>kPa | 冲击力/<br>(×10 <sup>5</sup> kN) |
|------|--------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------|----------------|-------------|-------------------------------|
| 1—1′ | 1.62                           | 5.56                          | 4           | 3.5e <sup>5</sup> , 1.5 | 1.33           | 67          | 0.56                          |
| 2—2′ | 1.69                           | 8.08                          | 6           |                         |                | 147         | 1.63                          |
| 3—3′ | 2.33                           | 6.38                          | 6           |                         |                | 126         | 1.26                          |
| 4—4′ | 1.79                           | 3.89                          | 3           |                         |                | 36          | 0.23                          |
| 5—5′ | 1.93                           | 3.53                          | 3           |                         |                | 32          | 0.21                          |
| 6—6′ | 1.65                           | 4.60                          | 2           |                         |                | 46          | 0.14                          |

3 官坝河泥石流防治建议

总结了官坝河泥石流的活动历史、动力学特征参数和邛海泥沙淤积特征,建议官坝河泥石流的防治原则应以保护官坝河上游居民和保护邛海为主,尽量减少官坝河上游滑坡和崩塌物产生的细颗粒进入邛海,结合官坝河沟道地形地貌特征、物源量和动力学特征参数,建议在官坝河主沟及各支沟下游处设置以拦挡细颗粒为主的拦砂坝和修建排导槽并定时清淤,以减少进入邛海的泥沙。同时在主沟及各支沟上游有施工条件的地方尽量多修建谷坊,以形成谷坊坝群效应,起到稳固沟床,拦挡大颗粒作用,在保护官坝河上游居民的安全,同时减轻下游拦砂坝的拦挡压力。另外考虑了地震和极端降雨情况,建议拦砂坝和谷坊采用高强度混凝土,确保其施工质量。

4 讨论

官坝河泥石流容重计算采用了两种截然不同的方法,这两种方法在计算官坝河泥石流最大容重值时存在较大波动,而计算其他支沟泥石流容重偏差较小。这是由于目前基于物体颗粒级配的泥石流容重计算的不成熟和青藏高原东南缘构造断陷湖泥石流的特殊性引起的结果,即泥石流搬运的粗大颗粒堆积在沟床中,而泥石流演化成高含沙水流以后细颗粒随洪水进入湖中,调查中无法获得更全面的颗分资料。因而进一步研究青藏高原东南缘构造断陷湖的泥石流沟容重值变化过程存在困难。另外 1998 年官坝河向邛海以山洪泥石流方式运移的泥沙总量占当年邛海泥沙淤积总量的 67.2%。说明泥石流对邛海可持续利用非常不利。最后总结了官坝河百年一遇

的清水流量  $497 \text{ m}^3/\text{s}$  与集水面积  $106.64 \text{ km}^2$  成5倍关系,其他断面的百年一遇清水流量与面积之比在4~7倍之间浮动,可为计算川滇地区其他构造断陷湖的泥石流沟提供经验估算公式。

#### 参考文献:

- [1] 张永双,曲永新,赵希涛,等. 青藏高原东南缘第四纪工程地质概论[M]. 北京:地质出版社,2010.
- [2] 周静,王苏民,吕静. 洱海地区一万多年以来气候环境演化的湖泊沉积记录[J]. 湖泊科学,2003,15(2):104-111.
- [3] 张振克,沈洁,羊向东,等. 近8ka来云南洱海湖泊沉积记录的气候变化与夏季印度季风强弱变化的关系[J]. 亚热带资源与环境学报,2008,3(3):1-6.
- [4] 张振克,吴瑞金,沈洁,等. 近1800年云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录[J]. 湖泊科学,2000,12(4):297-303.
- [5] 姚远,张恩楼,沈洁,等. 云南属都湖流域人类活动的湖泊沉积响应[J]. 海洋地质与第四纪,2007,27(5):115-120.
- [6] 余斌,王士革,章书成,等. 鹅掌河泥石流对四川邛海影响的初步研究[J]. 湖泊科学,2006,18(1):57-62.
- [7] 朱海虹. 云南断陷湖泊的形成和晚新生代的沉积及其演化[J]. 海洋与湖沼,1991,22(6):509-516.
- [8] 朱海虹,姚秉衡. 云南断陷湖泊三角州沉积及其在石油勘探中的意义[J]. 石油与天然气地质,1989,10(2):95-106.
- [9] 王小雷,杨浩,赵其国,等. 云南茈仙湖近现代环境变化的沉积物粒度记录[J]. 沉积学报,2010,28(4):776-782.
- [10] 袁国林,李昌侯,米鸿雁,等. 邛海湖盆形态研究[J]. 海  
洋湖盆通报,2006(2):18-26.
- [11] Liu Yong, Zhou Feng, Guo Huaicheng, et al. Biotic condition assessment and the implication for lake fish conservation: a case study of Lake Qionghai, China [J]. Water and Environment Journal,2009,23(3):189-199.
- [12] 余斌,章书成,王士革. 四川西昌邛海的浊流沉积初探[J]. 沉积学报,2005,2(4):559-565.
- [13] 蒋树,文宝萍. 国内外泥石流活动关键指标估算方法之比较[J]. 水文地质工程地质,2012,39(3):86-96.
- [14] 闻学泽,吴迪忠. 四川西昌邛海第四纪盆地成因的探讨[J]. 地质评论,1985,31(4):360-366.
- [15] 陈宁生,崔鹏,刘中港,等. 基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算[J]. 中国科学:E辑,2003,33(增刊):164-174.
- [16] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报,2008,26(5):789-796.
- [17] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):10-19.
- [18] 陈宁生,杨成林,周伟,等. 泥石流勘查技术[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [19] 邓虎,陈宁生,胡桂胜,等. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流流动力学特征参数计算[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(4):833-838.
- [20] 周必凡,李德基,罗德富. 泥石流防治指南[M]. 北京:科学出版社,1991.
- [21] 何思明,吴永,沈均. 泥石流大块石冲击力的简化计算[J]. 自然灾害学报,2009,18(5):51-56.

(上接第263页)

- [4] 马金玉,刘晶森,李世奎,等. 基于实验观测的光合有效辐射特征分析[J]. 自然资源学报,2007,22(5):673-682.
- [5] 李韧,季国良,杨文,等. 青藏高原北部光合有效辐射的观测研究[J]. 太阳能学报,2007,28(3):241-247.
- [6] 中国气象局,地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003:120.
- [7] Lu Yurong, Gao Guodong. Physical climatology[M]. Beijing: Meteorology Pre,1987:39-56.
- [8] 季国良,马晓燕,邹基玲,等. 张掖地区的光合有效辐射特征[J]. 高原气象,1993,12(2):141-146.
- [9] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Monthly ratios of PAR to global solar radiation measured at northern Tibetan Plateau, China[J]. Solar Energy,2010,84(6):964-973.
- [10] 周允华,项月琴,单福芝. 光合有效辐射(PAR)的气候学研究[J]. 气象学报,1984,42(4):387-397.
- [11] 王梓坤. 概率论基础及其应用[M]. 北京:科学出版社,1976.
- [12] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.