

# 松塔水电站上游土石围堰邓肯 $E-B$ 、 $E-\mu$ 模型参数试验研究

张亚丽<sup>1</sup>, 薛鹏松<sup>2</sup>, 张园园<sup>2</sup>, 王天祥<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024;

2. 北京木联能工程科技有限公司, 北京 100011)

**摘要:** 西藏松塔水电站需在 70 多米深厚覆盖层上修建高度超过 60 m 的土石围堰, 在国内还没有先例。围堰填筑后, 基础覆盖层的水文地质条件尤其是物理力学性能将发生一定变化, 对围堰稳定及防渗墙的应力应变等带来不利影响。为此, 展开河床覆盖层各层及围堰堰料的邓肯-张模型参数试验研究, 为进行有限元应力应变计算、安全性评价提供参数。

**关键词:** 土石围堰;  $E-B$ 、 $E-\mu$  模型参数; 试验研究; 松塔水电站

## Experimental Researches on Duncan $E-B$ and $E-\mu$ Model Parameters of Upstream Earth-Rock Cofferdam in Songta Hydropower Station

ZHANG Yali<sup>1</sup>, XUE Pengsong<sup>2</sup>, ZHANG Yuanyuan<sup>2</sup>, WANG Tianxiang<sup>2</sup>

(1. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China;

2. Beijing Millennium Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100011, China)

**Abstract:** Songta Hydropower Station in Tibet need to construct a cofferdam with height of more than 60 m on overburden with depth more than 70 m. There is no similar cofferdam constructed in China. After the cofferdam is constructed, the hydro-geological conditions, especially the physical and mechanical properties of riverbed overburden, will be changed which will adversely affect the stability of cofferdam and the stress and strain of impermeable wall. For this reason, the experimental researches on Duncan  $E-B$  and  $E-\mu$  model parameters of riverbed overburden and cofferdam material are carried out to provide parameters for stress and strain finite element calculation and safety evaluation.

**Key Words:** earth-rock cofferdam;  $E-B$  and  $E-\mu$  model parameter; experimental research; Songta Hydropower Station

中图分类号: TV223.4(275)

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2016)02-0116-04

## 1 研究背景

西藏松塔水电站是怒江中游规划河段的龙头水库, 以发电为主。枢纽建筑物主要由拦河坝、地下厂房、岸塔式进水口、尾水隧洞、尾水调压室等组成。电站最大坝高 307 m, 正常蓄水位 1 925 m。坝址处河谷呈“V”形, 两岸地形陡峻, 山高谷窄, 谷底宽 95~145 m, 局部仅 60~70 m, 河床覆盖层厚一般为 58~70 m, 局部厚达 82.6 m。

施工导流初拟采用断流围堰一次拦断河流、隧洞导流、拦河坝基坑全年施工的导流方式。导流建筑物级别为 3 级, 上游围堰距坝轴线约 360 m, 围堰

挡水设计标准采用全年 30 年一遇洪水, 相应流量 7 640 m<sup>3</sup>/s。围堰最大挡水水位 1 756.07 m, 上游围堰堰顶高程 1 758.0 m, 最大堰高 64.0 m, 围堰轴线长约 200 m, 围堰防渗平台(1 711.0 m 高程)以下部分堰体及基础覆盖层采用混凝土防渗墙防渗, 防渗平台以上部分采用土工膜防渗。堰前库容 3.56 亿 m<sup>3</sup>, 挡水时段约 3 年。

松塔上游围堰具有工程量大、施工强度高、堰

收稿日期: 2015-03-20

作者简介: 张亚丽(1974—), 女, 河北邯郸人, 教授级高工, 从事岩土力学试验研究工作。

前库容大、堰后基坑深、挡水历时长等特点,并且在 70 多米的深厚覆盖层上修建高度超过 60 m 的高围堰在国内还没有先例。围堰填筑后基础覆盖层的水文地质条件、物理力学性能将发生一定变化,对围堰稳定及防渗墙的应力应变等不利,为此展开河床覆盖层各层及围堰堰料的邓肯 E-B、E-μ 模型参数试验研究,并进行应力应变的有限元计算,作出安全性评价并论证堰料的允许范围及防渗墙的厚度,提出推荐的围堰体形、填筑材料和防渗墙厚度。

2 研究方法

根据河床覆盖层、围堰各工程区堰料颗粒组成,进行不同试样尺寸的三轴剪切试验,试验类型采用饱和固结排水剪(CD)。邓肯 E-B、E-μ 模型参数的获得基于双曲线、指数、直线各种关系曲线假定。

有效黏聚力  $c_d$  和有效内摩擦角  $\varphi_d$  通过绘制主应力差  $\sigma_1 - \sigma_3$  与轴向应变  $\varepsilon_1$  关系曲线、极限摩尔应力圆求得。其中,  $\sigma_1$  为大主应力,  $\sigma_3$  为小主应力。非线性指标  $\varphi_0$ 、 $\Delta\varphi$  由剪切角  $\varphi \sim \lg\sigma_3$  关系求得:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/p_a) \tag{1}$$

式中,  $p_a$  为大气压力。初始切线模量  $E_t$  为  $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$  图线拟合直线后截距  $a$  的倒数,斜率  $b$  的倒数为双曲线极限强度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}$ 。破坏比  $R_f$  由下式计算

$$R_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}} \tag{2}$$

式中,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  为强度破坏时的主应力差。

邓肯 E-B、E-μ 模型假设  $E_t = k \times p_a (\sigma_3/p_a)^n$ , 在双对数坐标上绘制  $\lg(E_t/p_a) \sim \lg(\sigma_3/p_a)$  关系曲线,直线拟合后  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$  时的  $E_t/p_a$  为  $k$ ,斜率为  $n$ 。邓肯 E-B、E-μ 模型认为初始泊松比  $\mu_i$  与  $\lg(\sigma_3/p_a)$  呈线性关系,为此  $\mu_i \sim \lg(\sigma_3/p_a)$  关系曲线可进行线性拟合,纵坐标轴截距为  $G$ 、曲线斜率的绝对值为  $F$ 。据下式计算初始切线体积模量

$$B_i = (\sigma_1 - \sigma_3) / 3\varepsilon_v \tag{3}$$

式中,  $\varepsilon_v$  为体积应变。在双对数坐标上绘制  $\lg(B_i/p_a) \sim \lg(\sigma_3/p_a)$  关系曲线,为直线。当  $\sigma_3/p_a$  为 1 时,直线在纵坐标上的截距为  $K_d$ ,斜率为  $m$ 。

3 坝址区河床覆盖层

坝址区河床覆盖层物质组成主要有崩坡积物( $Q_4^{\text{崩}}$ )、冲积物( $Q_4^{\text{冲}}$ )、洪积物( $Q_4^{\text{洪}}$ )等,由下至上划分为 7 层:第①层,卵石混合土,厚 0~14.5 m;第②层,含细粒土砂,厚 12.7~35.3 m;第③层,混合土漂石,厚 16.5~32.5 m;第④层,粉土质砂,厚 5.9~18.7 m;第⑤层,卵石混合土,厚 0~7 m;第⑥层,级配不良砂,厚 9~26 m;第⑦层,卵石混合土,厚度 0~18.7 m,部分地段有少量砂层,定名为级配不良砂,试验编号为⑦-1 层,见图 1。

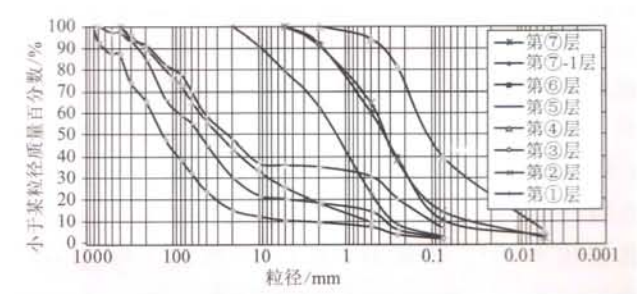


图 1 河床覆盖层各层试料颗粒大小分布曲线

砂层(⑦-1、⑥、④、②层)采用钻孔原状样进行试验,根据厚度不同各层试验分 40~100 组不等,干密度平均值分别为 1.80、1.69、1.65、1.69 g/cm<sup>3</sup>,孔隙比平均值分别为 0.340、0.379、0.394、0.379;相对密度平均值分别为 0.66、0.80、0.97、0.78。三轴剪切(CD)试验围压采用 400~2 800 kPa,试验成果汇总见表 1。

砂砾石层(⑦、⑤、③、①层)采用探坑或钻孔取扰动样进行试验。试验干密度按天然密度或指定干密度进行,试验级配按天然级配采用结合法缩尺后进行。各层干密度平均值分别为 2.19、2.20、

表 1 河床覆盖层砂层三轴试验强度指标及邓肯 E-B、E-μ 模型参数

| 分层  | 线性指标                   |                             | 非线性指标                       |                                 | $k$                    | $n$                 | $R_f$               | $G$                 | $F$                 | $D$                 | $K_d$                  | $m$                 |
|-----|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
|     | $c_d/\text{kPa}$       | $\varphi_d/(\text{^\circ})$ | $\varphi_0/(\text{^\circ})$ | $\Delta\varphi/(\text{^\circ})$ |                        |                     |                     |                     |                     |                     |                        |                     |
| ⑦-1 | 135.7~137.4<br>(136.6) | 33.1~33.7<br>(33.4)         | 42.1~42.5<br>(42.3)         | 4.9~5.8<br>(5.4)                | 362.2~390.6<br>(376.4) | 0.36~0.34<br>(0.35) | 0.78~0.84<br>(0.81) | 0.34~0.35<br>(0.35) | 0.17~0.18<br>(0.18) | 3.74~3.94<br>(3.84) | 156.8~162.5<br>(159.7) | 0.13~0.15<br>(0.14) |
| ⑥   | 81.3~182.6<br>(148.4)  | 30.2~33.6<br>(31.7)         | 40.0~45.7<br>(42.3)         | 5.8~7.6<br>(6.5)                | 218~499.4<br>(331.7)   | 0.41~0.55<br>(0.47) | 0.61~0.88<br>(0.80) | 0.28~0.36<br>(0.33) | 0.03~0.19<br>(0.15) | 3.02~7.2<br>(4.13)  | 73.4~359<br>(193.8)    | 0.06~0.33<br>(0.17) |
| ④   | 114.5~137.8<br>(128.4) | 30.4~32.6<br>(31.0)         | 43.2~40.2<br>(40.4)         | 4.9~6.9<br>(5.8)                | 135~271.3<br>(221.5)   | 0.43~0.63<br>(0.51) | 0.65~0.79<br>(0.72) | 0.23~0.32<br>(0.29) | 0.09~0.17<br>(0.13) | 3.50~6.44<br>(4.57) | 56.2~136.1<br>(103.6)  | 0.14~0.47<br>(0.30) |
| ②   | 111.5~185.5<br>(151.8) | 30.1~33.8<br>(31.3)         | 39.0~44.0<br>(42.0)         | 3.3~7.6<br>(6.6)                | 177.3~418.9<br>(276.0) | 0.34~0.53<br>(0.42) | 0.6~0.84<br>(0.74)  | 0.26~0.36<br>(0.31) | 0.12~0.2<br>(0.15)  | 3.04~4.32<br>(3.48) | 52.5~262.8<br>(120.8)  | 0.03~0.43<br>(0.23) |

注:( )中为平均值。

2.20、2.20 g/cm<sup>3</sup>，孔隙比平均值为0.247、0.235、0.240、0.236，相对密度平均值分别为0.73、0.83、0.88、0.79。三轴试验围压采用200~2 800 kPa，试验成果汇总见表2。

4 围堰堰料

围堰堰料主要是块石、石渣混合料、砂砾石料。堰料采用坝肩开挖微~新石渣料和导流洞洞挖料，岩性为黑云二长花岗岩，弱风化~微风化，石质坚硬，不易软化破碎，石料饱和抗压强度≥40 MPa。水下抛投填料自然固结压密，水上填料分层碾压密实。堰料按工程区分过渡料、垫层料、堆石料、砂砾料进行试验，其中堆石料分水上、水下两种状态。各区堰料干密度控制参数为：垫层料相对密度≥0.80，干密度1.93~2.04 g/cm<sup>3</sup>，平均为1.99 g/cm<sup>3</sup>，孔隙比0.309~0.337，平均为0.323；过渡料相对密度≥0.85，干密度1.93~2.04 g/cm<sup>3</sup>，平均为1.99 g/cm<sup>3</sup>，孔隙比0.342~0.382，平均为0.363；堆石料孔隙率≤22%，干密度2.08 g/cm<sup>3</sup>，孔隙比0.284，堆石料（水下）干密度2.00 g/cm<sup>3</sup>，孔隙比0.335；砂砾料（水下）干密度1.90 g/cm<sup>3</sup>，

孔隙比0.405，试验级配按设计级配（见图2）采用结合法进行缩尺得到。三轴剪切（CD）试验围压采用300~1 200 kPa，成果见表3。

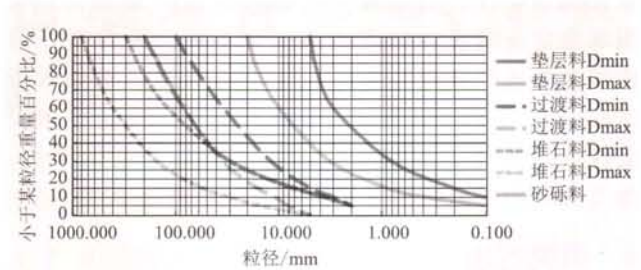


图2 围堰堰料设计级配曲线

5 结论

（1）从坝址区河床覆盖层各砂层试验成果可以看出，随颗粒级配由粗到细，强度指标及模型参数 $c_d$ 、 $\varphi_d$ 、 $\varphi_0$ 、 $k$ 、 $R_f$ 、 $G$ 、 $F$ 、 $K_d$ 逐渐变小，参数 $n$ 、 $m$ 逐渐变大。坝址区河床覆盖层各砂砾石层，级配较为接近，强度及模型参数也比较接近，级配较粗的③层（混合土漂石）， $k$ 及 $K_d$ 值较其他3层（卵石混合土）大，说明随级配变粗参数 $k$ 、 $K_d$ 增大。

表2 河床覆盖层砂砾料三轴试验强度指标及邓肯 E-B、E-μ 模型参数

| 分层  | 线性指标             |                      | 非线性指标                |                          | $k$                    | $n$                 | $R_f$               | $G$                 | $F$                  | $D$                 | $K_d$            | $m$                 |
|-----|------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|     | $c_d/kPa$        | $\varphi_d/(^\circ)$ | $\varphi_0/(^\circ)$ | $\Delta\varphi/(^\circ)$ |                        |                     |                     |                     |                      |                     |                  |                     |
| 第⑦层 | 26~74<br>(53)    | 39.0~41.4<br>(40.0)  | 45.0~47.9<br>(46.5)  | 3.4~7.0<br>(5.8)         | 584~928<br>(788)       | 0.39~0.49<br>(0.44) | 0.82~0.96<br>(0.87) | 0.40~0.51<br>(0.46) | 0.04~0.20<br>(0.11)  | 1.10~2.75<br>(1.85) | 286~556<br>(427) | 0.40~0.48<br>(0.45) |
| 第⑤层 | 104~154<br>(127) | 38.6~38.7<br>(38.6)  | 46.5~47.4<br>(47.1)  | 4.9~6.0<br>(5.4)         | 533~1 194<br>(852)     | 0.33~0.42<br>(0.38) | 0.68~0.81<br>(0.72) | 0.33~0.40<br>(0.36) | 0.08~0.14<br>(0.10)  | 3.29~4.92<br>(3.45) | 251~526<br>(410) | 0.24~0.36<br>(0.30) |
| 第③层 | 123~161<br>(141) | 38.6~39.9<br>(39.2)  | 45.9~47.4<br>(46.6)  | 3.5~5.1<br>(4.1)         | 1 281~1 483<br>(1 384) | 0.16~0.29<br>(0.23) | 0.79~0.82<br>(0.81) | 0.39~0.46<br>(0.44) | 0.13~0.19<br>(0.148) | 3.45~4.77<br>(3.92) | 481~650<br>(590) | 0.15~0.26<br>(0.19) |
| 第①层 | 82               | 39.6                 | 45.3                 | 3.6                      | 807                    | 0.46                | 0.79                | 0.34                | 0.09                 | 4.38                | 267              | 0.45                |

注：（ ）中为平均值。

表3 围堰堰料三轴试验强度指标及邓肯 E-B、E-μ 模型参数

| 分层          | 线性指标             |                      | 非线性指标                |                          | $k$                  | $n$                 | $R_f$               | $G$                 | $F$                 | $D$                 | $K_d$            | $m$                 |
|-------------|------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|             | $c_d/kPa$        | $\varphi_d/(^\circ)$ | $\varphi_0/(^\circ)$ | $\Delta\varphi/(^\circ)$ |                      |                     |                     |                     |                     |                     |                  |                     |
| 过渡料         | 56~95<br>(76)    | 38.7~40.2<br>(39.4)  | 47.2~47.6<br>(47.4)  | 5.9~6.8<br>(6.4)         | 654~765<br>(710)     | 0.23~0.25<br>(0.24) | 0.71~0.76<br>(0.73) | 0.22~0.38<br>(0.30) | 0.02~0.22<br>(0.12) | 4.89~5.28<br>(5.09) | 260~329<br>(295) | 0.13~0.19<br>(0.16) |
| 堆石料         | 71~93<br>(91)    | 40.9~41.1<br>(40.7)  | 48.3~49.3<br>(48.8)  | 5.9~6.9<br>(6.4)         | 742~1 479<br>(1 063) | 0.15~0.37<br>(0.30) | 0.73~0.76<br>(0.75) | 0.37~0.45<br>(0.40) | 0.15~0.24<br>(0.19) | 5.46~6.74<br>(6.20) | 482~630<br>(532) | 0.10~0.30<br>(0.17) |
| 堆石料<br>(水下) | 43~134<br>(91)   | 37.2~39.7<br>(38.7)  | 45.3~49.6<br>(47.8)  | 4.8~9.3<br>(7.1)         | 471~857<br>(611)     | 0.16~0.39<br>(0.30) | 0.68~0.75<br>(0.72) | 0.29~0.37<br>(0.33) | 0.14~0.20<br>(0.17) | 4.43~6.51<br>(5.32) | 211~314<br>(248) | 0.10~0.31<br>(0.30) |
| 垫层料         | 108~146<br>(127) | 32.0~37.5<br>(34.8)  | 48.8~49.6<br>(49.2)  | 9.0~14.7<br>(11.9)       | 640~975<br>(808)     | 0.19~0.40<br>(0.30) | 0.77~0.85<br>(0.81) | 0.34~0.43<br>(0.38) | 0.09~0.23<br>(0.16) | 3.81~5.20<br>(4.51) | 254~478<br>(366) | 0.20~0.11<br>(0.16) |
| 砂砾料<br>(水下) | 34               | 38.6                 | 43.4                 | 4.2                      | 206                  | 0.62                | 0.70                | 0.25                | 0.09                | 4.32                | 82               | 0.51                |

注：（ ）中为平均值。

(2) 围堰各工程区料源均为黑云二长花岗岩, 各区的设计级配变化规律是: 垫层料细于过渡料, 过渡料细于堆石料, 砂砾料级配则介于过渡料上下包线之间。尽管这三区干密度填筑控制参数不同, 但仍呈现出随各区设计级配由细变粗变化, 强度指标由小变大的规律。垫层料  $\varphi_d$  ( $32.0^\circ \sim 37.5^\circ$ ) 小于过渡料  $\varphi_d$  ( $38.7^\circ \sim 40.2^\circ$ ), 过渡料小于堆石料  $\varphi_d$  ( $40.1^\circ \sim 41.1^\circ$ )。

(3) 堆石料(水下)与堆石料设计级配相同, 试验干密度分别为  $2.00$ 、 $2.08 \text{ g/cm}^3$ , 有效内摩擦角  $\varphi_d$  分别为  $37.2^\circ \sim 39.7^\circ$  和  $40.1^\circ \sim 41.1^\circ$ , 说明随干密度减小, 有效内摩擦角减小。砂砾料设计级配接近过渡料下包线, 两者干密度接近, 分别为  $1.90$ 、 $1.93 \text{ g/cm}^3$ , 有效内摩擦角  $\varphi_d$  分别为  $38.6^\circ$ 、 $38.7^\circ$ , 也十分接近。

(4) 试验成果整体说明, 颗粒性质、颗粒组成、级配是否良好、含水量、密度等都影响三轴试验成果, 颗粒越坚硬、密度越大、粗颗粒含量越多、级配良好, 三轴剪切试验的强度指标值越高。

(上接第6页) 植物恢复研究多以草甸恢复为主, 在利用草皮切割移植、撒播草种等方式作用下, 草甸恢复可行性较强, 但灌丛恢复目前研究较少。

鉴于西藏横断山高寒地区水电植被恢复工作目前主要借鉴类似区域植被恢复理论及经验, 尚无系统性、针对性强的理论及野外试验研究, 为科学指导区域水电开发过程中的环境保护工作, 建议应尽快开展该区域水电工程植被恢复相关专题研究。

## 参考文献:

- [1] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原研究横断山考察专集[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] 中国科学院程度山地灾害与环境研究所. 横断山研究文集[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989.
- [3] 武振华. 横断山的地理位置和自然保护[J]. 中国西藏: 中文版, 1994(5): 38-39.
- [4] 环境保护部, 中国科学院公告 2008 年第 35 号 全国生态功能区划[S].
- [5] 环境保护部环办[2012]4号 关于进一步加强水电建设环境保护工作的通知[S].
- [6] 中国科学院植物研究所, 中国科学院长春地理研究所. 西藏植被[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [7] 王孙高. 澜沧江流域(西藏段)植被分布与地形因子关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2009.
- [8] 王孙高. 澜沧江(西藏段)流域种子植物区系研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2008(S2): 377-383.
- [9] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏森林[M]. 北京: 科

(5) 室内三轴剪切试验用于获得邓肯模型参数, 优点是应力应变、排水边界条件等可明确控制, 缺点是受到试样的代表性、数量、试验级配缩尺倍数的选择等因素影响。通过对松塔水电站大量试验获得的强度参数和 E-B、E- $\mu$  模型参数进行统计, 对数据展现出的一般性规律进行了初步探讨和总结。但具体到更细致的各因素对试验参数的影响研究, 还需要更多、更系统的试验工作。

## 参考文献:

- [1] SL 228—98 混凝土面板堆石坝设计规范[S].
- [2] DL/T 5355—2006 水电水利工程土工试验规程[S].
- [3] DL/T 5356—2006 水电水利工程粗粒土试验规程[S].
- [4] 李广信. 关于 Duncan 双曲线模型参数确定的若干错误做法[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 119.
- [5] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990.
- [6] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 西安: 黄河水利出版社, 1998.

(责任编辑 焦雪梅)

学出版社, 1985.

- [10] 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院. 澜沧江上游(西藏境内河段)水电规划环境影响报告书[R]. 贵阳: 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 2012.
- [11] 穆军, 李占斌, 李鹏, 等. 干热河谷水电站弃渣场植被恢复技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 245-252.
- [12] 卢炜丽, 陈奇伯, 黄鹏飞, 等. 金沙江金安桥水电站废弃地植被恢复研究[J]. 中国水土保持, 2011(2): 58-61.
- [13] 江洪. 云杉种群生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [14] 张翠叶, 幸福梅, 杨小林, 等. 川滇高山栎体胚诱导关键影响因素研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014(1): 51-56.
- [15] 王国严, 徐阿生. 川滇高山栎研究综述[J]. 四川林业科技, 2008(2): 23-34.
- [16] 李晋, 张劲峰, 景跃波, 等. 滇西北亚高山植被恢复中存在的问题及对策探讨[J]. 林业资源管理, 2011(1): 30-34.
- [17] 杨军, 李荣伟, 胡庭兴, 等. 岷江上游亚高山针叶林植被恢复研究综述[J]. 四川林业科技, 2007(1): 23-28.
- [18] 魏建方. 基于青藏铁路建设影响高寒植被再造技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [19] 陈志国, 周国英, 陈桂琛, 等. 青藏铁路格唐段高海拔地区植被恢复研究——I 高寒草原植被现状与恢复基本途径探讨[J]. 安徽农业科学, 2006(34): 6283-6285.
- [20] 国家环境保护总局环境工程评估中心. 新建铁路青藏线格尔木至拉萨段工程竣工环境保护验收调查报告[R]. 北京: 国家环境保护总局环境工程评估中心, 2007.

(责任编辑 陈 萍)