

# 青藏高原典型冰碛土的物理力学特性研究\*

方学东<sup>①②</sup> 黄润秋<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

(<sup>②</sup>中国民航飞行学院研究生处 广汉 618307)

**摘要** 在被称为世界屋脊的青藏高原,更新世全球冰河期发生了多次冰川作用,留下了大量冰川遗迹。作为冰川遗迹之一的冰碛土,属于特殊的工程岩土,具有成分复杂、结构混杂、物理力学性质变化大的特点,容易和坡积物、残积物等第四系堆积物混淆。在建的亚丁机场位于稻城海子山,场址地基土为稻城冰帽消融所形成的冰碛土,具有青藏高原冰碛土的典型性。为了掌握冰碛土的特殊物理力学性质,揭示其与冰川演化之间的关系,通过对亚丁机场场道地基的勘察,完成了典型冰碛土粒度成分分析、现场及室内物理力学性质测试,以及冰碛土 ESR 测年。研究表明,亚丁机场场址的冰碛土形成于  $37\pm 5\text{ka B. P.}$ ; 由于大小混杂、颗粒级配良好 ( $C_u=8.05, C_c=1.09$ ),在后期多次冰川的压实作用下,表现出密度高、空隙比小、地基变形模量和承载力高的特性,平均前期固结压力达到  $290\text{kPa}$ ,可作为高原重大工程的天然良好地基。

**关键词** 青藏高原 冰碛土 物理特性 力学特性

中图分类号: P642.14 文献标识码: A

## PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TYPICAL MORaine SOIL ON THE QINGHAI-TIBET PLATEAU

FANG Xuedong<sup>①②</sup> HUANG Runqiu<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>The State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

(<sup>②</sup>The Graduate Department of Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307)

**Abstract** There were many times of glacial actions during the pleistocene global ice ages in the Qinghai-Tibet Plateau that is well-known as the roof of the world, leaved a lot of glacial traces. The moraine soil belongs to the special engineering soils, which has complicated composition, mixed structure and changeable physical and mechanical properties. The moraine soil is usually confused with diluvium and eluvium. The site of constructing Yading airport is located at Daocheng Haizi Mountain. Its foundation soil is a typical Qinghai-Tibet Plateau moraine soil, and stacked up after the Daocheng ice cap melt. In order to master the moraine's special physical and mechanical properties, and reveal the relationship between moraine's properties and the glacier evolution, the composition analysis, physical and mechanical properties testing, and ESR dating were carried out during the Yading airport foundation survey. Research shows that the moraine soil of Yading airport, stacked up during  $37\pm 5\text{ka BP}$  and compacted by the glacier, has the characteristics of higher density, lower void ratio, higher foundation deformation modulus and bearing capacity. Moraine soil belongs to the over-consolidated soils( average preconsolidation pressure

\* 收稿日期: 2012-08-10; 收到修改稿日期: 2012-09-29.

第一作者简介: 方学东, 工程地质专业. E-mail: fxdong5616@163.com

is about 290kPa) and can be used as a good natural foundation of major engineering in the Qinghai-Tibet Plateau.

**Key words** Qinghai-Tibet Plateau, Moraine soil, Physical properties, Mechanical properties

## 1 引言

2006年,中国民用航空局发布了规划至2020年的全国民用运输机场发展规划,明确提出:至2020年,包括重庆、四川、云南、贵州和西藏在内的西南地区完成52个运输机场的布局,构建西南机场群<sup>[1]</sup>。西南机场群的建设场址大多位于我国地形的第一和第二台阶<sup>[2]</sup>。在青藏高原地区建设机场,面临山高谷深、净空条件差、工程地质条件和气象复杂多变等问题<sup>[3]</sup>。考虑机场供水、交通等因素,早期的西南地区机场建设一般选址在山间谷地,如西藏林芝机场、西昌青山机场等,但山谷地带的机场由于净空条件差,障碍物众多,飞行程序设计困难。后期建设的机场逐渐上移到山腰、山顶,如攀枝花机场、九寨黄龙机场、康定机场和亚丁机场等,以满足净空要求。

青藏高原地形相对平坦的区域大多为第四纪夷平面,标高大多在4000~5000m之间,分布有冰碛土等第四纪冰川遗迹。在青藏高原的康定机场<sup>[4-6]</sup>、川藏公路然乌-鲁郎段<sup>[7]</sup>、西藏巴河水电站<sup>[8]</sup>等工程建设项目中,研究人员对作为特殊工程岩土的冰碛土特性进行过分析研究。这些研究工作仅限于局部场址,缺乏对冰碛土特性与青藏高原第四纪冰期冰川演化之间关系的研究。通过对目前在建的全球海拔最高的亚丁机场工程勘察,采用冰碛土ESR测年和物理力学性质测试等研究方法,获取合理的场道地基处理物理力学参数,揭示冰碛土特性和冰川演化历史之间的关系,对于其他冰碛土地基工程项目的建设具有重要的参考价值。

## 2 亚丁机场工程地质条件

在建的亚丁机场位于甘孜州稻城县桑堆乡西北的海子山上,属于青藏高原东南缘横断山区,跑道长度4200m,机场设计标高4409m,为目前全球海拔最高的机场。

机场所在的海子山是青藏高原最大的古冰体遗迹-稻城古冰帽,为典型的丘状高原,向南渐变为山原地貌、高山峡谷地貌。亚丁机场的场址处于其松宗曲与巴隆曲所夹的走向南南东的平顶山梁上。山顶海拔4400~4500m,与两侧河流高差120~400m。山顶面波状起伏,高差20~30m,为冰川丘陵地貌。从南到北分布着近东西向展布的垄岗和凹地,垄岗东西长800~1600m,宽可达600m,凹地内常有含巨大漂砾的厚度不等的底碛,其上有海子和沼泽地发育(图1)。

亚丁机场场区出露的地层主要包括印支期花岗岩和第四系稻城冰帽形成的冰碛层。印支期花岗岩为岩基状,呈北西-南东展布,略向西弧形凸出,局部含有花岗细晶岩脉、花岗正长岩脉、钾长花岗岩和正常伟晶岩脉等。现场工程地质测绘结合室内薄片鉴定,场区岩体属二长花岗岩体边缘相到过渡相,场区南端以钾长花岗岩为主,大南坳与牦牛坳之间垄岗(航站楼区)以钾化中粒二长花岗岩为主,中段和北端以浅灰色中粒斜长花岗岩为主。场区冰碛土覆盖层主要由含碎石砂土及漂砾组成,厚薄不均,呈现垄岗薄、坳地厚的特征,钻孔揭露的最厚覆盖层达38.4m,最薄仅0.5m。以后冲兴填方区一带跑道标高4405m计算,该坳地钻孔所揭露冰碛土覆盖层厚

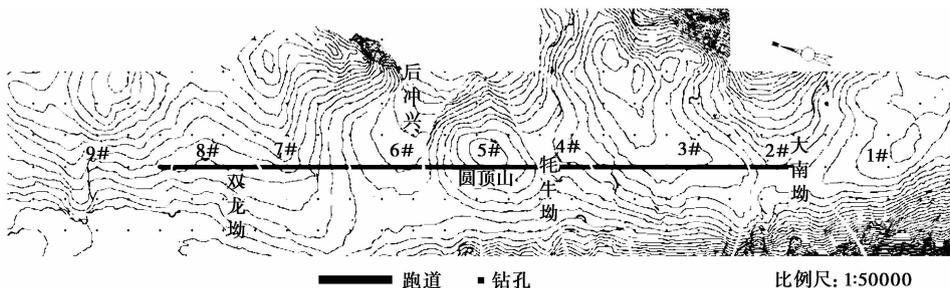


图1 亚丁机场场址地形

Fig. 1 Terrain of Yadong airport site of the highest elevation among all airports in the world

度从 3.5m 到 38.4m 不等(表 1)。表中钻孔  $x$  坐标垂直于跑道轴线指向 NE,  $y$  坐标平行于跑道轴线指向 SE, 跑道北端入口坐标为(10000, 17800)。

表 1 后冲兴覆盖层厚度及填方高度

Table 1 Soil depth and fill height at Houcongxing hollow

孔号	$x$	$y$	开孔 高程/m	覆盖层 厚度/m	填方 高度/m
zk79	10095.52	19249.2	4383.91	7.5	21.09
zk80	10045.08	19252.69	4384.48	5.9	20.52
zk81	10000.35	19251.65	4385.74	3.5	19.26
zk82	9955.977	19248.19	4386.31	4.4	18.69
zk83	9901.895	19248.2	4387.70	6.9	17.30
zk87	10090.61	19301.96	4381.57	6.2	23.43
zk88	10043.28	19301.17	4382.01	6.5	22.99
zk89	9997.846	19299.83	4383.21	5.0	21.79
zk90	9952.92	19301.48	4384.41	6.8	20.59
zk91	9901.466	19301.3	4385.54	5.5	19.46
zk94	10098.16	19356.37	4380.49	5.9	24.51
zk95	10049.34	19350.38	4381.23	5.2	23.76
zk97	9953.356	19350.27	4382.74	6.0	22.26
zk98	9905.544	19349.66	4383.93	5.7	21.07
zk102	10095.34	19401.71	4379.47	6.1	25.53
zk103	10048.16	19401.08	4380.35	6.1	24.65
zk104	10003.22	19396.29	4380.74	4.7	24.26
zk105	9950.803	19399.62	4381.81	22.4	23.19
zk106	9903.754	19402.5	4382.69	38.4	22.31
zk110	10041.98	19450.17	4379.22	7.5	25.78
zk111	9957.032	19451.8	4380.70	31.9	24.30
zk112	9904.796	19451.04	4382.54	5.6	22.46
zk115	10093.5	19499.53	4378.21	10.2	26.78
zk116	10045.83	19500.94	4378.71	12.6	26.29
zk118	9957.325	19500.89	4380.76	6.4	24.24
zk119	9905.367	19502.94	4381.64	5.4	23.36
zk122	10098.75	19547.9	4377.23	12.2	27.77
zk123	10043.65	19545.32	4378.73	7.0	26.27
zk124	9997.014	19550.72	4379.35	6.2	25.65
zk125	9951.581	19552.36	4380.69	13.5	24.31
zk126	9904.84	19549.81	4382.08	6.9	22.92

根据现场调查,亚丁机场场址地质构造简单,仅发育小断层和节理裂隙,无活动断层。场区无崩塌、滑坡、泥石流等不良地质现象。

根据气象台观测,场址区月平均最高气温 4.0~16.6℃之间,最热月 7 月为 16.6℃;月平均最低气温 4.8~-9.3℃,最冷月 1 月-9.3℃,极端最低可达-16.8℃。由于太阳辐射强烈,地温高于气温。大气降水主要集中在 6 月上旬至 9 月末,降雪时间

集中在 11 月至次年 4 月。由于场址位于高原夷平面,两侧为深切河谷,冰碛土含水量较低,仅每年 1~2 月在坳地部位形成数十厘米冻土。做好机场排水系统避免降水渗入地基土体,机场地基不会发生冻胀破坏。场区主要的工程地质问题为深厚冰碛土覆盖层及上覆冰碛土填方体构成复合地基的沉降变形问题。

### 3 亚丁机场地基冰碛土的粒度成分分析

作为冰川前进时搬运迁移、冰川后退时消融沉积而形成的特殊土,冰碛土的土颗粒粒度大小及各粒度成分百分含量的大小,以及冰碛土颗粒结构紧密程度,构成了影响冰碛土物理力学性质的内在因素。

为系统分析亚丁机场冰碛土的颗粒粒度成分,确定其颗粒级配,判断级配是否良好,采用筛分法筛分出不同粒径的土粒,称出其重量后用不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  来定量评价冰碛土的颗粒级配,  $C_u \geq 5$ , 且  $C_c \in (1, 3)$  为级配良好土<sup>[9]</sup>。 $C_u$  和  $C_c$  的计算公式为:

$$C_u = d_{60}/d_{10}$$

$$C_c = d_{30} \cdot d_{30}/d_{10} \cdot d_{60}$$

式中,  $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$  分别为土的累积百分含量达到 10%、30% 和 60% 时对应的土粒粒径。

对在亚丁机场现场所采取的 22 组土样进行了室内颗分试验,得出各粒径区间的颗粒组成百分比,并为土样进行定名。所有 22 组土样中大于 0.075mm 粒径土颗粒的含量都超过了 50%,冰碛土属于典型的粗粒土;22 组土样中包括 1 组角砾、15 组砾砂、2 组粗砂、4 组中砂。从 6 个载荷试验坑(图 1,大南坳、牦牛坳、后冲兴各 2 组)采集土样进行颗分(表 2),并依据第 4 组冰碛土样的颗粒累计曲线(图 3),计算出该土样的不均匀系数为 8.05,曲率系数为 1.09。根据分析土样的各粒组含量、不均匀系数与曲率系数,认为亚丁机场的冰碛土颗粒

表 2 载荷试验点冰碛土定名及不均匀系数与曲率系数

Table 2 Name,  $C_u$  and  $C_c$  of moraine at loading test point

土样编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6
定名	砾砂	砾砂	角砾	砾砂	粗砂	砾砂
$C_u$	16.324	9.520	26.520	8.050	7.860	23.200
$C_c$	0.442	0.839	0.965	1.090	1.414	1.393

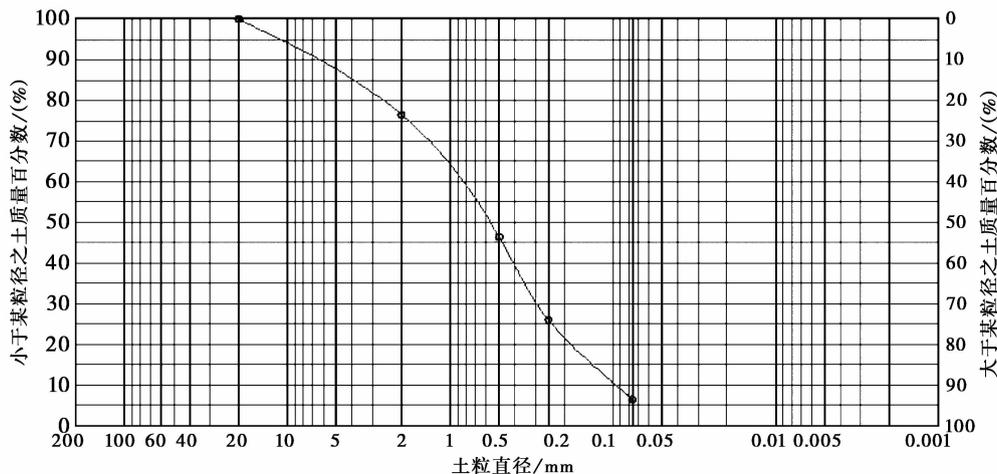


图2 P4冰碛土的颗粒累计曲线

Fig. 2 The Cumulative curve of moraine grain at P4

不均匀,粗颗粒多,细颗粒少。

## 4 亚丁机场冰碛土物理力学性质研究

### 4.1 冰碛土物理性质实验

亚丁机场冰碛土的物理性质试验通过采取原状土样,室内测试土粒密度、含水量、天然密度等指标的方式进行。

为了和冰碛土的力学性质试验相结合,揭示土颗粒级配和物理性质、力学性质之间内在的相关性,从现场载荷试验的地点采取原状土,分别在室内完成物理性质测试和压缩试验。共对6组土样进行了物理性质测试。采用环刀法测试密度、烘干法测试含水量,推算出干密度后结合土粒密度推算出孔隙比。从6组冰碛土样物理性质测试的结果(表3)可知,冰碛土的平均含水率为13.12%,平均土密度为 $2.06\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,平均干密度为 $1.82\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,平均孔隙比为0.462。另外,对10组土样所进行的室内压缩试验计算得到冰碛土压缩系数介于 $0.1\sim 0.23\text{MPa}^{-1}$ ,说明亚丁机场冰碛土结构较紧密,压缩性中等。

### 4.2 冰碛土地基变形特性研究

冰碛土作为机场工程的场道地基,其变形模量的大小对于场道地基的沉降量评价和控制具有决定性作用。冰碛土地基变形特性的研究采用现场静载荷试验进行测试。试验中,主要采用直径800mm,面积为 $0.5\text{m}^2$ ,厚度大于25mm的圆形钢板,采用慢速法加载,加载级数取10~12级,单级荷载值根据预估承载力与加载级数来确定。试验结束后,按照

表3 亚丁机场冰碛土物理性质测试结果

Table 3 Test result of moraine physical property of YADING airport

物理指标	土样编号					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
土粒密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
含水率/(%)	17.6	17.3	12.1	9.7	11.7	10.3
土的密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.07	1.95	2.20	2.10	1.99	2.03
干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.76	1.66	1.96	1.91	1.78	1.84
孔隙比	0.506	0.596	0.352	0.387	0.489	0.440

单级卸载值为单级加载值的2倍进行卸载,直至荷载为0,继续记录沉降3h后结束试验工作。根据试验记录数据绘制压力位移( $p-s$ )曲线,从曲线即可计算出冰碛土地基的承载力特征值和压缩模量,一般用 $p-s$ 曲线直线段的终点所对应的荷载值作为承载力特征值,而变形模量利用下式计算。

$$E_0 = I_0(1 - \nu^2) \frac{pd}{s}$$

式中, $I_0$ 为刚性承压板的形状系数,圆形承压板取0.785; $\nu$ 为土的泊松比(碎石土取0.27,砂土取0.30); $d$ 为承压板直径(m); $p-p-s$ 曲线线性段的压力(kPa); $s$ 与 $p$ 对应的沉降值(mm)。

现场静载荷试验的成果(表4)中P1的变形模量和P5的承载力特征值偏小。P1变形模量偏小的原因是由于试验过程中油泵机箱的电源线意外断开,使得变形有一定的回弹。P5荷载点的承载力特征值异常偏低的原因是试验时土体由于降雨地表水汇聚而饱水,且表层腐质土未完全挖除。剔除异常偏低数据后,亚丁机场冰碛土的承载力特征值为

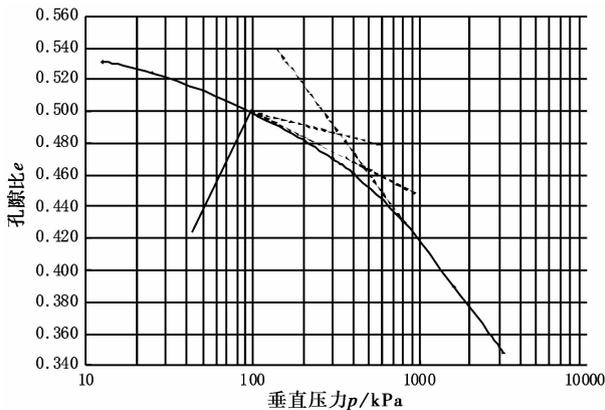
表4 亚丁机场冰碛土地基载荷试验数据

Table 4 Result of moraine ground load test of YADING airport

编号	试验深度/m	压板面积/m <sup>2</sup>	承载力特征值/kPa	变形模量/MPa	前期固结压力/kPa
P1	0.4	0.5	440	13.1	340
P2	0.8	0.5	480	31.9	180
P3	0.4	0.5	540	76.7	200
P4	0.4	0.5	600	53.6	340
P5	0.3	0.5	140	26.3	300
P6	0.3	0.28	250	72.3	425

250~600kPa, 变形模量为31.9~76.7MPa。

为判断冰碛土是否存在由于多期冰川压实, 后期冰川消融而形成超固结特性, 利用现场载荷试验点挖取现场原状土进行室内压缩试验, 绘制各土样的  $e$ - $\lg p$  曲线, 利用曲线采用作图法得出各土样的前期固结压力。P1 载荷点土样的  $e$ - $\lg p$  如图3所示; 6组土样的前期固结压力值一并列于表4。由试验结果可见, 亚丁机场冰碛土存在超固结现象, 前期固结压力介于180~425kPa。

图3 P1 冰碛土试样的超固结压缩试验  $e$ - $\lg p$  曲线Fig. 3 The  $e$ - $\lg p$  curve of moraine sample

## 5 亚丁机场冰碛土特性与稻城冰帽演化关系分析

亚丁机场冰碛土为稻城冰帽的冰川遗迹, 根据冰碛地貌形态及其分布, 通过电子自旋共振 (ESR) 直接测年, 稻城冰帽区自中更新世以来, 共经历6次较大规模的冰川前进<sup>[10]</sup>。最早的冰川作用, 对应稻城冰期, 最盛时出现在571.2ka B. P. 前后。第2次冰川作用, 对应横断山区的绒坝岔冰期, 于134.8ka B. P. 左右达到最盛<sup>[11, 12]</sup>。第3、4、5、6次较大规模

冰川前进分别于43.2a B. P.、27.2、16.7ka B. P.、15~13.6ka B. P. 前后规模达到最大。

为判明亚丁机场场区冰碛土形成年代, 采集钻孔土样在成都理工大学实验室进行了ESR测年。105号钻孔21.90m处土样的测年结果为38±5ka B. P., 84号钻孔3m处土样的测年为37±5ka B. P.。105号和84号钻孔冰碛土测年数据, 介于第3和第4次冰川前进之间, 说明亚丁机场场区的冰碛土为稻城冰帽第3和第4次冰期之间间冰期的产物。场区冰碛土沉积后还经历了晚更新世3次冰川的压实作用, 尤其稻城冰帽倒数第3次冰期(27.2ka B. P.) 对应横断山区的晚更新世末次盛冰期, 较厚的冰川对场区冰碛土起到超固结压实作用, 使其表现出超固结土特性。根据实测冰碛土的前期固结压力平均值290kPa, 以冰在0℃的密度0.917计算, 亚丁机场冰碛土承受过的上覆冰川厚度达31.6m以上。

## 6 结论

(1) 亚丁机场场址地基土为青藏高原地区典型的第四纪冰川形成的冰碛土, 是稻城冰帽消退过程中冰川融化而形成的堆积物。

(2) ESR测年结果显示, 亚丁机场场址冰碛土形成于为37±5ka B. P. 及38±5ka B. P., 介于稻城冰帽区晚更新世第3、4次大规模冰川前进之间。

(3) 由于亚丁机场冰碛土堆积后, 经历了青藏高原横断山区晚更新世末次盛冰期等3次冰川(推算的冰川厚度达31.6m以上)的压实作用, 使得冰碛土表现出超固结土特性, 测试土样的平均前期固结压力达到290kPa。亚丁机场冰碛土大小颗粒混杂堆积、级配良好, 具有良好的物理力学特性, 平均土密度达2.06g·cm<sup>-3</sup>, 平均孔隙比为0.49, 承载力特征值为250kPa~600kPa, 变形模量为31.9~76.7MPa。

## 参 考 文 献

- [1] 中国民用航空局. 全国民用机场布局规划[R]. 2006. Civil Aviation Administration of China. Civil Airport Layout Planning. 2006.
- [2] 谢宇. 丰富的地貌[M]. 北京: 中国工人出版社, 2004. Xie Yu. Abundant Landforms. Beijing: China Worker Publishing House, 2004.
- [3] 刘宏. 四川九寨沟黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究

- [D]. 成都:成都理工大学, 2003.
- Liu Hong. The Systematic Research of Sichuan Jiuzhai-Huanglong Airport High Embankment Deformation and Stability. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2003.
- [4] 李公水, 任剑, 刘宏. 康定机场冰碛土特性及地基处理[J]. 地质灾害与环境保护, 2007, **18**(4): 35~39.
- Li Gongshui, Ren Jian, Liu Hong. Plateau moraine soil characteristics and its reinforcement methods. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, **18**(4): 35~39.
- [5] 谢春庆. 川西冰碛层工程勘察方法研究[J]. 勘察科学技术, 2002, (5): 16~19.
- Xie Chunqing. Study of engineering investigation method for glacial deposit of the west of Sichuan. Survey Science and Technology, 2002, (5): 16~19.
- [6] 谢春庆. 冰碛土工程性能的研究[J]. 山地学报, 2002, **20**(增): 129~132.
- Xie Chunqing. The engineering properties of moraine. Journal of Mountain Science, 2002, **20**(S): 129~132.
- [7] 袁广祥, 曾庆利, 尚彦军. 川藏公路然乌-鲁朗段冰碛高边坡稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2007, **18**(4): 47~51.
- Yuan Guangxiang, Zeng Qingli, Sang Yanjun. Stability analysis of high moraine slopes in Ranwu to Lulang section of Sichuan-Tibet highway. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, **18**(4): 47~51.
- [8] 刘昌. 西藏巴河冰碛物的工程特性[J]. 水力发电, 1998, (8): 14~16.
- Liu Chang. The engineering properties of Tibet Bahe moraine. Hydraulic Power, 1998, (8): 14~16.
- [9] 李晶, 尹洪峰. 工程岩土学[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2006.
- Li Jing, Ying Hongfeng. Science of Engineering Rock and Soil. Shenyang: Northeastern University Press, 2006.
- [10] 许刘兵, 周尚哲, 崔建新. 稻城冰帽区更新世冰川测年研究[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(5): 529~533.
- Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Cui Jianxin. Dating of the Pleistocene glaciations around the Daocheng ice cap. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(5): 529~533.
- [11] 郑本兴. 云南玉龙雪山第四纪冰期与冰川演化模式[J]. 冰川冻土, 2000, **21**(1): 53~60.
- Zheng Benxing. Quaternary glaciation and glacier evolution in the Yulong mount, Yunnan. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **21**(1): 53~60.
- [12] 苏珍, 施雅风, 郑本兴. 贡嘎山第四纪冰川遗迹及冰期划分[J]. 地球科学进展, 2002, **17**(5): 639~646.
- Su Zhen, Shi Yafeng, Zheng Benxing. Quaternary glacial remains on the Gongga Mountain and the division of glacial period. Advance in Earth Sciences, 2002, **17**(5): 639~646.