

川藏公路特殊碎屑流灾害综合防治技术

张小刚^{1,2}, 杨天军³, 田金昌³

ZHANG Xiao-gang^{1,2}, YANG Tian-jun³, TIAN Jin-chang³

1. 中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室, 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. 西藏自治区交通工程质量安全监督局, 西藏 拉萨 850000

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

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

3. Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Bureau of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, Tibet, China

摘要:川藏公路帕隆藏布沿岸路段广泛发育一种特殊的碎屑流灾害——溜砂坡, 危害十分严重。通过近几年的研究与工程实践, 溜砂坡灾害的防治对策可归纳为避让与清除、砂源区控制技术、固砂技术、拦砂技术与排砂技术五大类。根据溜砂坡灾害的基本特征、发育阶段及道路工程所处的环境条件, 有针对性地选择防治技术, 才能取得较好的防治效果。

关键词:川藏公路; 溜砂坡; 防治; 关键技术

中图分类号: P694; P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2013)12-2031-07

Zhang X G, Yang T J, Tian J C. The comprehensive prevention and control measures of debris flow along the Sichuan-Tibet Highway. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12): 2031-2037

Abstract: The sand-sliding slope, which belongs to one of special types of debris flow, has been a common geohazard along the Sichuan-Tibet Highway. On the river bank of Palongzangbu along the Sichuan-Tibet Highway, the sand-sliding slope is characterized by wide distribution and serious damage. Based on several years' research and engineering practice, the authors classified the prevention and control measures for the sand-sliding slope into five sorts, i.e., avoidance and mucking, sand source control, sand consolidation, sand retaining and sand draining. To achieve the better control effect, we should select some prevention and control measures in a well-targeted manner and take into account the basic features and developmental stage of the sand-sliding slope and environmental conditions encountered by the Sichuan-Tibet Highway.

Key words: Sichuan-Tibet Highway; sand-sliding slope; prevention and control; key measures

川藏公路是世界上道路工程自然环境条件最差、灾害影响最强烈的交通干线。在川藏公路帕隆藏布沿岸路段, 广泛发育一种特殊的碎屑流灾害——溜砂坡, 活动剧烈, 危害严重。溜砂坡指高陡的岩(土)质斜坡, 遭受强烈的物理风化作而形成大量砂粒和岩屑, 在重力作用下, 发生多种方式的运动并在坡脚堆积成锥状斜坡的自然演变过程。按照国际上广泛采用的 Varnes D J 滑坡分类方案, 可归于第六

大类: 复合移动类^[1-3]。

近几十年来, 随着西藏公路交通建设的发展, 在川藏公路的改扩建过程中, 引发了大量新老溜砂坡的活动, 频繁发生碎石和砂粒溜向公路、覆盖路面、埋设工程设施、中断交通的事件, 甚至时常发生溜砂中挟带的大块石、巨石砸坏车辆和砸伤行人的事故。据近几年的统计, 川藏公路每年因溜砂坡灾害造成的直接与间接经济损失超过 10×10^6 元。严重制约了

收稿日期: 2013-08-20; 修订日期: 2013-11-04

资助项目: 国家科技支撑计划专题项目(编号: 2012BAK10B02-4)、国家自然科学基金项目(批准号: 40971015)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号: 2013CB733205)

作者简介: 张小刚(1966-), 男, 本科, 教授级高工, 从事山地灾害发育规律与防御技术研究。E-mail: zxg@imde.ac.cn

沿线地区的经济发展。以往对溜砂坡灾害防治技术的研究较少。采用修建挡砂墙等简单的工程方法来防治溜砂坡灾害,时常出现挡砂墙倾斜失效、砂体漫过墙顶危害公路等诸多问题,达不到彻底治理灾害的目的。近年来,随着对川藏公路溜砂坡灾害认识的不断深入,一些新的防治技术逐渐地被应用于溜砂坡灾害的防治中。

1 溜砂坡的危害

川藏公路的溜砂坡灾害十分发育,特别是在帕隆藏布上游峡谷段,溜砂坡连续成群分布。如川藏公路米堆沟口—中坝段,仅 20km 左右路段内就分布超过 30 处的溜砂坡(图 1)。

溜砂坡的危害主要表现在以下几个方面。

(1)溜砂坡活动时,砂粒、岩屑常常掩埋公路,中断交通,摧毁坡脚处的建筑物。

(2)由于沿河道路多阵性大风、暴风,常常将砂粒扬起,加速了溜砂坡表层沙粒的运动,启动溜砂堆积体中的块石。高速跳跃、飞行的岩块和岩屑可撞坏挡风玻璃,威胁乘车安全,甚至出现溜砂埋人、滚石伤人事故。

(3)溜砂长期缓慢活动,破坏坡面植被,致使坡体寸草不生。

(4)在雨季,溜砂坡上的基岩凹槽或冲沟可汇集雨水而成坡面径流,与溜砂混合、搅拌成坡面泥石流,加重了对坡脚处道路工程的危害。

(5)源源不断地溜向河流的岩屑、砂粒导致河流泥沙含量增加,抬升河床,影响下游安全。规模大的溜砂坡还可阻断河流,形成堰塞坝。

2 溜砂坡灾害主要防治技术

近十余年来,针对溜砂坡灾害的防治,笔者等在川藏公路中坝段进行了大量研究与试验^[4-8]。当地交通管理部门结合川藏公路的整治改建项目,也进行了一些防治工程实践。总结起来,针对溜砂坡灾害的防治对策可归纳为避让与清除、砂源区控制技术、固砂技术、拦砂技术与排砂技术五大类(表 1)。

2.1 绕避与清除

对于高度上百米甚至上千米,或松散物质补给丰富的溜砂坡,很难进行有效的治理。若条件允许,应将公路工程移到溜砂坡活动范围之外。特别在公路的选线、改线等阶段,绕避往往能起到事半功倍的效果。



图 1 川藏公路中坝段溜砂坡的危害

Fig. 1 Serious damage in the Zhongba section of the Sichuan-Tibet Highway

在道路工程通过的溜砂坡路段,当松散堆积物源源不断地溜动、补给流砂坡堆积体时,即使设置了拦砂墙,溜砂仍可越过挡墙顶部,溜滑到公路上。可考虑在公路内侧预留一定的空地作为溜砂堆积空间,定期清除溜砂堆积物。该措施适宜在较宽的河段实施,施工工艺简单,既防止了溜砂对公路的危害,又不扰动现有溜砂坡的动态平衡条件(图版 I-a)。

2.2 砂源区控制技术

砂源区控制工程是从溜砂坡的形成及演化规律分析入手,控制砂源,使砂源区不产或者少产溜砂。这是遏制溜砂坡发育的理想对策。例如在砂源区的岩石上喷撒防冻快速固结剂等,可缓解岩体风化速度,达到控制砂源的作用。例如,王兆印等^[9]在四川绵远河小木岭的砂源区喷洒植物种子与稀泥浆的混合料,取得了较好的效果。

对于川藏公路来讲,由于砂源区多在 4000m 以上的高山,且面积巨大、实施难度较大,仅限于规模较小或保护对象特别重要的溜砂坡防治。

2.3 固砂技术

溜砂坡固砂技术可分为表部固砂技术和深部固砂技术 2 种。

2.3.1 表部固砂技术

(1)植被固砂工程

植被固砂工程是利用植被稳定溜砂坡表层。植物深根穿过浅层松散风化带伸入溜砂坡深部,具有锚固效应。大量浅根存在于砂坡表部,又具有加筋效

表 1 溜砂坡灾害防治对策
Table 1 Prevention and Control Measures of the Sand-Sliding Slope

序号	工程类别	工 程 措 施	适 用 性
1	绕避与清除	改线绕避或清除	规模较大、治理难度大的溜砂坡应尽量绕避;活动性弱的溜砂坡则可直接清除
2	砂源区控制技术	喷撒泥浆、水泥浆、防冻快速固结剂等	实施难度一般较大,适宜规模小或保护对象特别重要的溜砂坡
3	固砂技术	护面墙工程 SNS 柔性主动防护网 植被固砂工程 框架锚杆植被固砂技术 木桩排网植坡固砂技术 注浆固砂 花管微型树根桩固砂技术	适宜活动性一般的溜砂坡。具有投资较少、施工速度快、见效迅速的特点。通常作为保通措施采用
4	拦砂技术	拦砂墙 SNS 柔性被动防护网	适宜活动性较强的溜砂坡。技术成熟,施工简单,为最常用的防治措施
5	排砂技术	排砂渡槽 排砂棚洞	适宜砂源丰富、活动性强的溜砂坡。一次性投资较大,技术要求较高,但防治效果最好

应。同时,植物能有效消弱雨滴溅蚀、抑制地表径流、减弱风蚀或抑制风力扬砂所形成的沙尘暴。植被防护工程对溜砂坡稳定性的影响程度与根的直径、长度和根的沿伸方向密切相关。

利用植被固砂不仅防护时效长,还具有独特的环保意义,可以起到改善环境的作用。但植物在活动的砂坡上很难存活,措施收效慢,成为实际操作中的一个难题,常常需与其它土木工程措施配合使用。

(2)护面墙工程

护面墙工程设置于溜砂坡堆积体的表面,防止雨水的冲刷等引起砂坡表层坍塌。护面墙工程按材料与结构形式的不同包括干砌片石工程、浆砌片石工程、混凝土砌块工程、混凝土工程、格状框条工程、喷射混凝土浆等。

(3)SNS 主动防护网

SNS 防护系统起源于欧洲,已有 100 余年的历史,使用寿命可达 50~100a。防护网以钢丝绳作为主要组成部分,覆盖(主动防护)溜砂坡的表面,对坡面预先施加压力阻止表面砂石溜动,制止溜砂进一步蔓延,达到稳定坡面的目的。该类方法施工速度快、适应面广,适用于任何复杂的地形,同时又不破坏原始地貌,便于人工绿化,利于环保。适宜边坡高度不高或面积不大的溜砂坡防治(图版 I -b)。

(4)框架锚杆植被固砂技术

溜砂坡的最大特征是散粒体结构,颗粒之间的内聚力很小,可谓“一盘散沙”。只要开挖砂坡脚,或砂坡表部植被破坏,砂坡就会剧烈溜动。

针对溜砂坡的结构特征,在需防治的砂坡表面设置钢筋混凝土框架(框架部分或全部埋入溜砂坡表面),呈“井”字型排列。框架交叉处设置自进式锚杆。初步稳定砂坡坡面后,选择适生树种、草种,作为砂坡治理的先锋植物。采用一整套移栽、播种、抚育方法和措施提高植被的成活率,达到防治溜砂坡的目的。

在川藏公路示范区研究中,笔者等采用的纵梁间距为 8m、横梁间距为 5m、纵横梁为 C25 钢筋混凝土结构,截面尺寸 30cm×30cm。纵、横梁交叉处设置 R32S 自进式锚杆。锚杆长度 4~6m,采用水泥砂浆灌注,灌浆压力 0.3Mpa。再结合砂坡植被培养,选择乡土植物(当地植物)条播、穴播或撒播。灌木的首选物种为茶藨子,其次为黑果小檗和绢毛蔷薇。草本植物首选醉马草。半灌木甘青蒿和银蒿也可适量引入。植物一旦定居、存活,即可实现可持续防护效果。取得了较好的效果(图版 I -c)。

(5)木桩排网植坡固砂技术

砂坡的溜动始于表部砂粒,若将较大范围的溜

图版 I Plate I



a.公路内侧预留溜砂堆积空间;b.川藏公路中坝段溜砂坡的 SNS 主动防护网工程;c.川藏公路中坝段溜砂坡框架锚杆植被固砂技术试验;d.川藏公路中坝段溜砂坡木桩排网植坡固砂工程;e.川藏公路中坝段溜砂坡防治工程—拦砂墙;f.川藏公路中坝段溜砂坡防治工程—SNS 被动防护网图;g.川藏公路中坝段溜砂坡防治工程—排砂渡槽;h.川藏公路中坝段溜砂坡防治工程—排砂棚网

砂坡分成若干小块进行治理,只要每一小块的砂坡稳住,即可达到整个砂坡不会产生溜动。基本方法是将木桩置入(埋入或打入)砂坡中,桩顶用木条连接。桩旁间隔放置内部填充作为生态护坡材料的植生种植袋。木桩排网植被固砂工程适用于加固活动性不强、附近又有木桩原料的溜砂坡防治工程。该方法与挡砂墙工程配合使用,即能取得较好的效果。

木桩采用直径 15~30cm 的树干或枝条,桩长 1.0~1.5m。以平行等高线方向为行,以垂直等高线方向为列,按照 4~6m 的行距和列距,将木桩置入(埋入或打入)砂坡中,坡内深度 30~50cm。桩顶间隔用木条连接、钉牢,完成后可选择木桩间放置植生种植袋,并与木桩用尼龙绳连接。植生种植袋以三针加密绿色遮阳网为材料制作而成,内部填充包含土壤、复合肥、有机质与混合种子的拌和料。选择的混合种子为当地适生的草(灌)种,作为溜砂坡治理的先锋植物(图版 I-d)。

2.3.2 深部固砂技术

(1) 注浆固砂

注浆固砂的基本原理是向呈散体特性的砂坡内注入一定比例的粘粒、粉粒或者细粒浆液,使砂坡的粘聚力增大,提高砂坡的抗剪强度,从而增大其天然休止角,达到稳固砂坡的目的(图 2)。

注浆固砂的深度可达几十米,因而对深层砂土能起到很好的锚固效应与土拱效应。注浆本身的竖

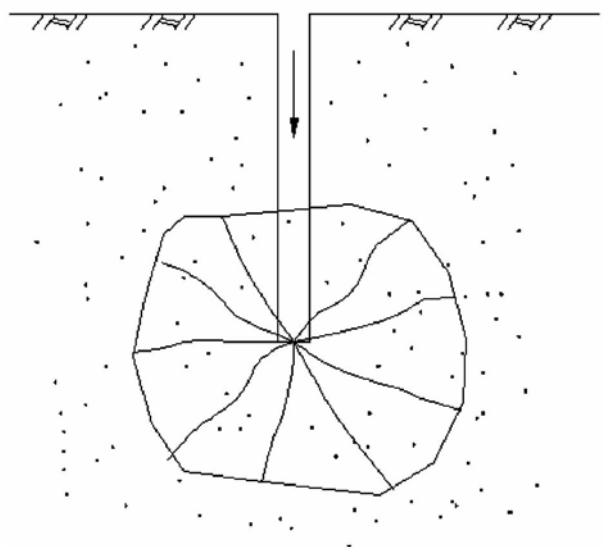


图 2 注浆工程锚固效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grouting engineering and anchoring effect

向浆柱起竖向锚固效应,同时相邻的浆柱间能产生土拱效应。底部的球形结石体能增大砂粒间的抗剪强度,有利于砂坡稳定。尤其在道路建设初期,注浆固砂工程对于保持砂坡稳定性的效果十分显著。缺点是对浅层砂土特别是表部砂土的作用有限。

(2) 花管微型树根桩固砂技术

花管微型树根桩技术本质上仍属于注浆固砂技术的一种。不同的是,在注浆管上预置了小孔,注浆时产生的侧向浆脉类似根系发达的树和灌丛,能起到侧向锚固效应,同时对深部与表部的砂坡起到稳定作用(图 3)。

实施方法:选用一定直径和长度的管材,在其上预置一定数量的小孔,自坡面打入(或钻孔导入)至设计深度,用中、低压灰浆泵向管中注入由粘土、粉土与水组成的浆液或水泥砂浆,形成树根状浆脉(图 3)。根据模型试验研究,笔者推荐花管微型树根桩固砂技术的参数建议值(表 2)。

2.4 拦砂技术

(1) 拦砂墙

拦砂墙工程是目前溜砂坡防治的最常用的工程措施,效果显著。该技术适用于砂源区已基本稳定、无明显砂粒溜动的溜砂坡地区。常用类型有条石(块石)浆砌重力式挡砂墙和桩板式挡砂墙(图版 I-e)。只要挡墙达到足够的高度,就可以限制溜砂的堆积范围,并使溜砂坡的坡度逐渐减缓,达到溜砂坡的天然休止角,最终中止溜砂活动,达到稳定坡面的目的。

① 条石(块石)浆砌重力式挡砂墙

重力式挡砂墙不仅适用于正在活动的砂坡,也适用于开挖已经稳定的且坡脚高度小于 4m 的溜砂坡。当开挖坡脚高度大于 4m 时,可以在墙体上部施

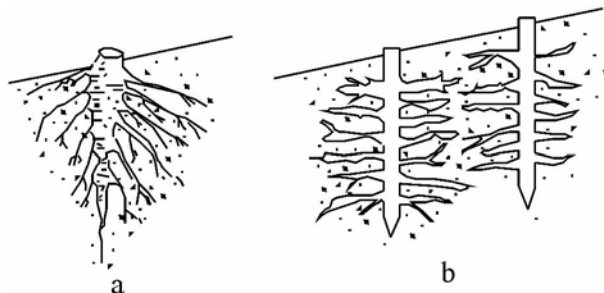


图 3 树根与树根桩固砂示意图(a 为普通树桩;b 为树根桩)

Fig. 3 Schematic diagram of roots and sand consolidation by root piles

表 2 花管微型树根桩固砂参数建议值

Table 2 Recommended values of parameters of sand consolidation by perforated pipe micro-root pile

花管直 径/mm	注浆小孔 直径/mm	小孔排列方式	浆液水:灰比	注浆压力 /MPa	注浆时间 /s · m ⁻¹
50~55	6	横向间距 4cm, 竖向间距 20cm	0.75:1.0~1.0:1.0	0.2~0.6	25
50~55	6	螺旋型, 4 孔组, 竖向间距 20cm	0.75:1.0~1.0:1.0	0.2~0.6	30
50~55	8	横向间距 5.2cm, 竖向间距 30cm	0.5:1.0~0.75:1.0	0.1~0.5	20

加锚杆、锚索, 或者把挡砂墙设计成多级台阶式, 以保证其稳定性。挡砂墙按照砂坡的天然休止角和作用在墙上的土压力进行设计。土压力值可采用改进的极限平衡土压力计算式进行计算^[10]。

$$Ea = \left[\frac{1}{2} \gamma H \cos \alpha (K \sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi) - cl \right] \cdot \cos \alpha$$

式中, Ea 为土压力; γ 为天然砂土的容量 (kN/m^3); φ 为天然砂土的内摩擦角; c 为砂土的粘聚力 (kPa); α 为溜砂体下界面倾角; l 为砂坡溜动的下界面长度 (m); H 为挡砂工程高度 (m); K 为安全稳定系数。

②桩板式挡砂墙

桩板式挡砂墙适用于开挖已经稳定的砂坡坡脚, 开挖高度以小于 4m 为宜。此方法不适宜发生边挖边溜状况。桩板式挡砂墙的桩基按抗滑桩设计。

需要注意的是, 由于在坡脚建挡墙, 抬高了该处溜砂滚石的下落高度。若挡砂墙高度设计不合理, 滚石会以更大的势能从挡墙顶部飞到公路上, 从而加大对行车的威胁。

(2) SNS 被动防护网

SNS 被动防护网是将 SNS 柔性防护网垂直于坡面, 形成栅栏形式的拦石网, 以拦截流砂, 特别是能拦截粒径较大的滚石。通过周边和内侧局部锚固柔性网系统, 采用上沿锚固和上沿支撑绳作为悬挂支撑, 形成“窗帘”式结构。允许落石在系统与坡面构成的相对封闭空间内有一定限制地顺坡滚落, 从而使落石在可控条件下顺坡安全向下滚落直至坡脚或坡上平台 (图版 I-f)。

SNS 被动防护网对溜砂发生频率较高或坡面施工作业难度较大的溜砂坡是一种较经济的防治方法。若与挡砂墙、SNS 主动防护网等其它措施配合使用, 能达到更好的防治效果。

2.5 排砂技术

对于处于发育活跃阶段的溜砂坡而言, 坡面防

护工程无法达到根治的目的, 深部固砂的难度也很大, 即可采用排砂技术。

排砂工程多采用渡槽、棚洞等措施, 保障溜砂从道路等线性工程之上通过。通过的溜砂在汛期能被洪水冲走, 处于动态平衡状态。此技术适用于砂源丰富和活性很强的溜砂坡灾害防治。排砂工程的结构类型分为钢筋混凝土结构和浆砌条石结构, 可参照抗滑明洞设计。

(1) 排砂渡槽

在砂坡规模较小、道路范围较窄, 并存在明显坡面径流作用的路段, 可采用渡槽形式使流砂从道路等线性工程之上通过 (图版 I-g)。

(2) 排砂棚洞

排砂棚洞适于砂坡规模大、危害道路范围宽、溜砂现象明显, 以及开挖坡度大于 4 m 的路段。排砂棚洞除挡砂功能外, 还能使多余的溜砂越过洞顶排到公路外侧, 将线路保护在棚洞之下。洞顶部应堆填缓冲土层, 并使棚洞顶部保持一定的倾角, 既可减弱滚石对棚洞顶部的冲击力, 又能促使滚石快速滚过棚洞顶部, 避免滚石在棚洞顶部堆积 (图版 I-h)。

3 结 语

溜砂坡是一种特殊的碎屑流灾害, 对川藏公路的危害十分严重, 制约了沿线地区的经济发展。溜砂坡灾害属于复合型灾害, 包括掩埋公路、中断交通、摧毁建筑物、溜砂埋人、滚石伤人、坏坡面植被、发育坡面泥石流、阻断河流等。

目前, 针对溜砂坡的综合防治技术的系统总结较少。通过近几年的研究实验与工程实践, 可将其防治技术归纳为避让与清除、砂源区控制技术、固砂技术、拦砂技术与排砂技术五大类。应根据溜砂坡灾害的基本特征、发育阶段及道路工程所处的环境条件, 有针对性地选择防治技术, 才能取得较好的防治效果。

致谢:成为过程中,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所王成华、陈自生研究员给予了悉心指导与帮助,西藏自治区交通工程质量安全监督局张正波高级工程师、强巴工程师等参与了部分野外调查或室内分析工作,中国地质科学院地质力学研究所吴树仁研究员认真审阅本文初稿并提出宝贵的修改意见,在此一并致谢。

参考文献

- [1]梁光模,王成华,张小刚.川藏公路中坝段溜砂坡形成与防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2003,12(4):33-38.
- [2]王成华,张小刚,阚云,等.粒状碎屑溜沙坡的形成和基本特征[J].岩土力学,2007,28(1):29-35.
- [3]陈自生. D J 伐恩斯的斜坡移动(广义滑坡)分类方案[C]//滑坡文集,第九集.北京:中国铁道出版社,1992:103-109.
- [4]梁光模,张小刚,吴国雄,等.西藏干线公路滑坡研究与防治[M].成都:四川科技出版社,2007:101-209.
- [5]周麟,王成华,张小刚,等.川藏公路中坝段溜砂坡植被护坡试验示范初报[J].山地学报,2005,23(增刊):140-146.
- [6]王成华,徐骏,何思明,等.粒状碎屑溜砂坡树根桩固砂防护技术[J].中国水土保持科学,2007,5(1):93-96.
- [7]罗德富,毛济周,朱平一,等.川藏公路南线(西藏境内)山地灾害与防治对策[M].北京:科学出版社,1995:99-125.
- [8]阚云,王成华,张小刚.川藏公路典型溜砂坡形成机理与整治[J].山地学报,2003,10(5):595-598.
- [9]王兆印,刘丹丹,施文婧.汶川地震引发的颗粒侵蚀及其治理[J].中国水土保持科学,2009,7(6):1-8.
- [10]王成华,阚云,徐骏,等.粒状碎屑溜砂坡运动方程与砂坡土压力计算[J].岩土力学,2007,28(7):1299-1303.

《地质通报》第 33 卷第 1 期要目预告

新疆哈拉奇区域地质矿产调查新成果和主要进展	刘晓煌等
塔里木盆地西北缘哈拉奇地区晚石炭亚纪—早二叠世哈拉奇组的建立	张新勇等
新疆色帕巴衣地区志留纪柯坪塔格组笔石的发现	王庆同等
西南天山康克林组早二叠世小型无鳞板珊瑚动物群的发现及其地质意义	王卫国等
新疆阿合奇地区晚石炭世—早二叠世筴类动物群	黄 兴等
新疆阿合奇地区石炭纪古岩溶的发现及其地质意义	赵志刚等
新疆哈拉奇地区泥盆纪层序地层学特征及沉积环境	张志臣等
新疆阿合奇地区哈拉奇组、康克林组碳酸盐岩微相特征和沉积环境	刘 涛等
新疆哈拉奇地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向	宋贺民等
新疆比勒提地区地球化学场多重分形及异常解释	王占彬等
新疆哈拉奇地区地面高精度磁测异常及解释	鲁世朋等
新疆喀默什特地区隐伏断裂高精度磁测解释	鲍宽乐等
新疆比勒提地区断裂构造磁异常信息提取及解释	王新华等
新疆萨喀尔得铜矿 C-H-O-S 同位素特征	吕兵团等
数字化填图:图面资料处理的自动化实现方法初探	张 泉等
碳酸盐岩地层中 B 元素测试——一种改进的 ICP-AES 法	刘玖芬等
1:5 万区调地球化学样品的分析质量监控	刘淑亮等
新疆阿合奇县旅游资源的 SWOT 分析	石满乾等