

青藏高原生态地质环境遥感调查研究

方洪宾¹, 赵福岳¹, 路云阁¹, 张瑞江¹, 张振德¹, 孙延贵², 姜琦刚³

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 青海省地质调查院遥感中心, 西宁 810012;
3. 吉林大学, 长春 130026)

摘要: 自2003年始开展的青藏高原生态地质环境遥感调查与监测项目已取得了阶段性的成果, 本文就项目涉及到的第四纪基础地质与第四纪冰川遗迹、现代冰川雪线、湖泊湿地、荒漠化等专题成果进行了简要介绍。本文明确了项目开展的意义, 给出了青藏高原生态地质环境质量的评价结果, 强调了地学因素对于青藏高原生态地质环境形成与演化的控制作用, 以及近30 a来全球气候变化对高原生态地质环境适应性变化的驱动作用。

关键词: 青藏高原; 遥感; 生态环境; 评价

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2007)04-0061-05

0 引言

青藏高原是目前地球上分布面积最大、纬度最低、海拔最高、形成时代最新的巨型地貌单元, 因其“高”和“寒”而被称为地球“第三极”。青藏高原有着复杂的地质作用背景, 自上新世以来, 受印度板块强烈的俯冲作用影响, 青藏高原形成了以雅鲁藏布江、班公湖—怒江、西金乌兰—金沙江、康西瓦等板块缝合带为界的多个地体(板块)拼合构造格局。晚新生代以来, 青藏高原的差异性隆起对其自身及毗邻地区自然环境的演化和分异影响深刻^[1-3], 一些全球性的重大环境事件也与青藏高原隆升为主体的构造运动联系密切^[4-6]。青藏高原隆升到一定高度后, 开始成为阻碍北半球正常西风环流的屏障。将以爬越高原为主的行星风系变为以绕流为主, 高原季风由浅薄系统变为深厚系统, 并促使亚洲环境格局发生重大转型, 形成季风控制的气候格局并导致亚洲内陆干旱化和黄土的广泛分布^[7]。青藏高原的隆升和相应的气候变化造就了大量的水系, 主要为平行造山带流动的纵向河流。伴随高原隆升, 河流下切形成了壮观的峡谷并携带走了大量的陆源碎屑物质, 沉积在远离高原的各种类型的盆地中和冲积平原上, 最终形成了现今青藏高原的整体轮廓、构造—沉积格局和亚洲重大水系格局^[3]。

青藏高原并非具有完全均一的环境本底。高原的差异性隆升使高原西部的上升幅度大于高原东部, 高原面由西向东倾斜, 海拔高度也由5 km以上

下降到3 km左右。新构造运动又导致高原边部因发生挤压而隆升, 腹地因东西向走滑伸展而形成明显的凹陷带。上述地学控制因素使得高原内各种生态、地质、环境要素梯度变大, 高原内广大地区生态和环境系统脆弱而敏感, 对于全球气候变化和人类扰动的响应迅速且又具有放大效应, 且破坏后极不易恢复。一方面, 高原本身蕴含巨大的生态资产, 经由各种生物地球化学循环过程流转高原以外的区域^[8], 为亚洲低地地区的人口、资源与环境的可持续发展提供物质和能量输入; 另一方面, 近30 a来, 全球气候变暖的趋势愈发明显, 再叠加上人类活动的影响, 高原各种生态、地质、环境要素发生快速适应性变化, 如现代冰川雪线大幅度退缩、水域湿地面积缩小、荒漠化扩张、草场退化、冻土层消融和崩塌、滑坡、泥石流等灾害地质现象发生。这些变化不但使青藏高原本身的生态环境质量变差, 而且对中国东部生态环境质量和中国社会经济的可持续发展构成不利影响, 因此开展针对青藏高原生态、地质、环境要素的调查与监测工作具有十分重要的现实意义。

步入新世纪, 中国和谐发展与可持续发展将面临更多的资源与环境问题, 这也是以遥感技术为核心的对地观测技术最具应用潜力的领域。遥感技术的宏观、快速、高效及动态等优势, 能够为开展大尺度资源、环境综合调查与监测提供可靠的技术保障。2003年, 在中央财政支持下, 启动了青藏高原生态地质环境遥感调查与监测项目, 利用卫星遥感技术首次开展了覆盖高原全域、多因子、多期次、综合性的调查与监测, 系统查明了青藏高原近

30 a 年来的生态地质环境现状及其变迁规律,取得了重要成果。这些成果的取得将对青藏高原的经济与社会可持续发展,生态地质环境保护乃至全球生态环境变迁的研究提供重要的基础地质信息和决策依据。

1 数据源和技术方法

遥感调查采用的遥感影像数据主要以 20 世纪 70 年代中期 Landsat MSS 数据、1990 年左右 Landsat

TM 数据及 2000 年左右 Landsat ETM 数据为主,部分重点地区选择年代最新的 Aster、QuickBird 等遥感影像作为补充。另外,青藏高原 20 世纪 60 年代的地形图是由航空相片转绘而来,因此也可作为一期遥感数据源。

在对遥感影像正射纠正基础上,制作 1:25 万标准影像地图并为各专题因子建立相应的遥感解译标志,采用人机交互解译和野外调查验证相结合的方式,最终得到专题因子的遥感解译图。项目开展的技术流程如图 1 所示。

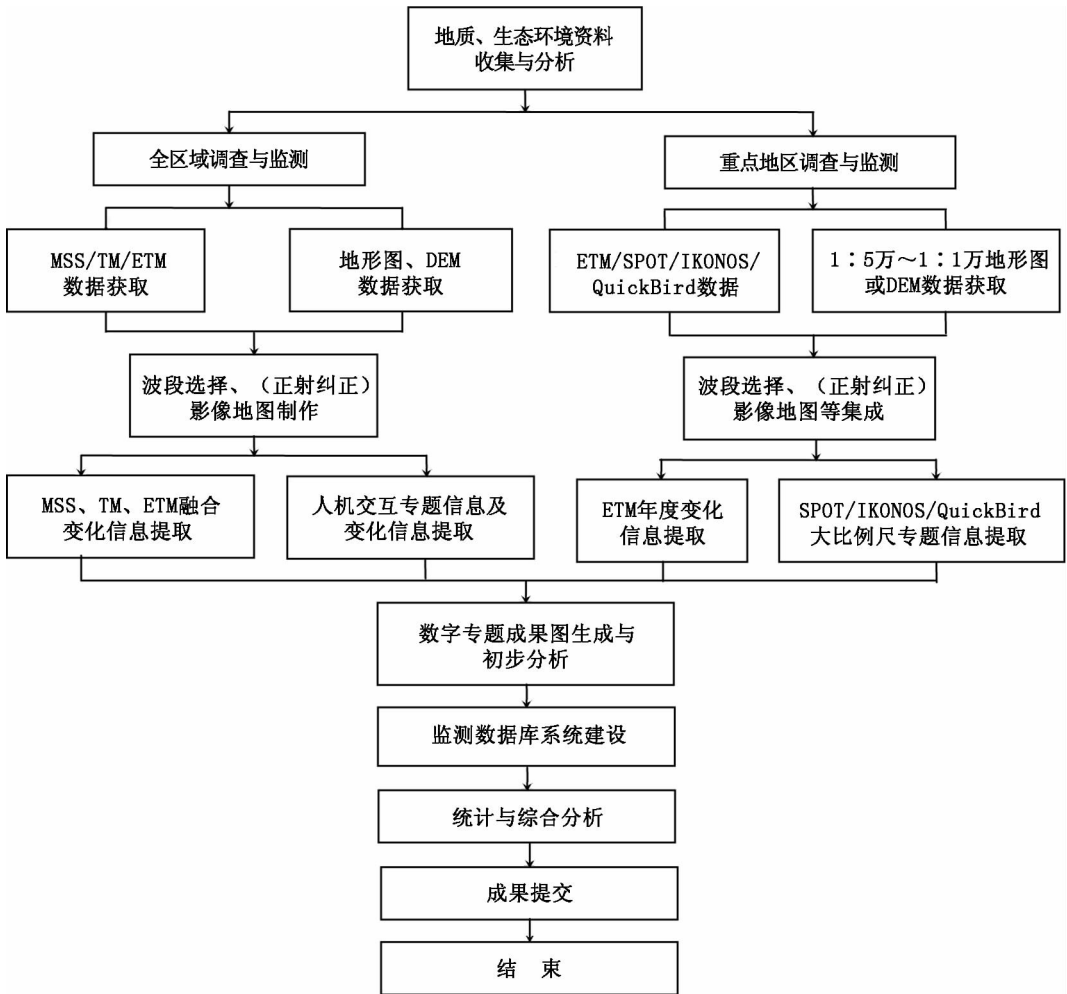


图 1 项目技术流程

2 主要专题因子调查结果

2.1 第四纪基础地质与第四纪冰川遗迹遥感调查

青藏高原第四纪时空分布及新构造运动特征是深入了解、探索青藏高原在新生代晚期地表运动学特征及其演化,并分析进行生态地质环境变化机理的地质基础。本次遥感调查将青藏高原新构造断裂分岩石圈断裂、区域性断裂和一般断裂等 3 种规模,正断层、逆断层、平移断层、平移正断层和平移逆断

层等 5 种类型,并将高原第四系划分出包括冲积(Q^{al})、洪积(Q^{pl})、风积(Q^{col})等 13 种主要成因类型,年代分属早更新世(Q_{p1})、中更新世(Q_{p2})、晚更新世(Q_{p3})以及全新世(Q_h)4 个时代。

青藏高原新构造断裂遥感调查结果表明:高原新构造运动具有南北分带、东西分块的非一致性特征,据此可将高原划分出 13 个各具不同运动学特征的新构造运动区,并建立了青藏高原新构造运动学遥感模型(图 2)。青藏高原第四纪沉积区总面积约为 70.06 万 km^2 ,受新构造运动控制,分布在 13 个



图 2 青藏高原新构造运动学遥感模型

相对较为独立的第四纪沉积区,且主要发育在高原西部,尤其是在北部压陷盆地区和腹地几个伸展断拗区的发育程度远远高于其它。调查研究发现,高原内部存在大量的北北东-南南西向、北东-南西向、北北西-南南东向新构造断裂,不仅在刻画现今青藏高原地表形态上起着显著的作用,而且对第四纪晚期即晚更新世-全新世时期的第四纪沉积作用具有比较明显的影响。分析认为,高原的剧烈隆升应在中新世,其南北分带、东西分块、边部挤压隆升及腹地伸展跨塌的运动状态下形成了诸多的近南北、北北东以及北东向断隆,东西向构造带内构成垒-堑式或断隆与断拗间列的新构造组合,高原边部的强挤压隆升构造单元,高原中东部形成的哈拉湖-念青唐古北东向新构造隆起带,以及由此产生的隆升剥蚀与断拗堆积均属于最新动力学状态下的变形产物,也是引起高原内部生态环境变化差异的地质起因。

青藏高原第四纪冰川作用可划分为山谷冰川和冰帽冰川 2 种类型,它们以冰川侵蚀的韧脊、角峰、冰斗、冰川槽谷、冰流槽古、冰蚀岩盆、冰碛湖泊和冰川堆积的丘陵、台地、阶地、垄岗等地貌遗迹形式存在。青藏高原第四纪冰碛物地貌次序以 4 阶地貌单元显示,第一阶为冰碛丘陵及台地地貌单元,第二阶为扇形及弧形冰碛台地垄岗地貌单元,第三阶为谷肩垄岗及台地地貌单元,第四阶为舌形垄岗地貌单元。空间组合以后向退置、后向退超或渐进超覆式 3 种形式存在。根据本次遥感调查,青藏高原第四纪冰川作用总面积为 121.01 万 km²,第四纪冰川遗迹面积为 116.32 万 km²,占高原总面积的 46.9%,而高原现代冰川仅占高原总面积的 1.81%。按山系统计的青藏高原第四纪冰川面积如表 1 所示。

青藏高原第四纪冰川的演变是在全球气候寒暖交替变化的基础上,随着青藏高原的逐步隆升和局部山系差异升降变化而相应变化,且经历了以昆仑冰期冰川作用为盛行期,倒数第二次冰期和末次冰期为扩充期,而冰后期以来的冰川作用为强烈退缩期之历时百万余年的演化过程。自更新世以来,高原发育的第四纪冰川遗迹不仅记录下高原存在着广泛的差异升降运动,同时证明了高原古大湖环境发生变化,以及北昆仑山、东喀喇昆仑和北祁连山等山

表 1 青藏高原各山系第四纪冰川面积(单位: km²)

山系名称	山系面积	第四纪冰川作用面积	第四纪冰川遗迹面积
帕米尔	34 936.07	24 798.88	22 468.66
祁连山	184 515.98	80 334.37	78 487.29
阿尔金山	40 022.94	5 240.28	4 990.29
柴达木	114 724.51	89.13	89.13
喀喇昆仑	33 333.04	22 610.34	16 235.69
昆仑山	561 599.50	225 449.86	213 500.69
羌塘高原	459 946.69	98 246.02	94 972.79
横断山	392 141.60	283 757.79	282 092.74
冈底斯山	156 070.90	87 889.27	86 248.24
唐古拉山	216 629.05	108 504.31	106 268.73
喜马拉雅山	223 878.88	129 812.67	122 949.36
念青唐古拉	160 931.75	143 354.66	134 896.78
总计	2 578 730.90	1 210 087.58	1 163 200.39

系存在明显的低化(垮塌与剥蚀夷平)作用,导致倒数第二次冰期以来,尤其是冰后期冰川作用范围明显减小,以至消失。

2.2 现代冰川雪线调查

主要利用 20 世纪 60 年代末地形图和 2000 年前后的 ETM 数据,对冰川面积进行有表碛冰川(指地表裸露冰体和被冰碛物覆盖隐伏冰体)面积变化的调查;利用 20 世纪 70 年代末的 Landsat MSS 数据和 2000 年的 Landsat ETM 二期影像数据,进行现代冰川变化信息的提取。本次调查结果表明,截至 2002 年,青藏高原冰川分布面积为 46 887 km²,减少了 3 941 km²,年均减少 131.4 km²。青藏高原按山系统计的现代冰川分布面积如表 2 所示。

表 2 青藏高原各山系现代冰川面积及变化情况

山系	基准面积/km ²	变化面积/km ²	年变化率/%
阿尔金山	250.15	10.43	0.14
冈底斯山	1 940.17	-330.97	-0.57
横断山	1 625.35	-33.27	-0.07
喀喇昆仑	6 958.95	-612.99	-0.29
昆仑山	12 489.04	-396.19	-0.11
念青唐古拉	8 976.95	-730.68	-0.27
唐古拉	2 332.40	-53.46	-0.08
帕米尔	2 753.42	-797.72	-0.97
羌塘高原	3 381.31	134.93	0.13
祁连山	2 040.25	-120.47	-0.20
喜马拉雅山	8 080.92	-1 490.39	-0.61
合计	50 828.91	-4 420.78	

青藏高原现代冰川雪线时空变化特征表现为:高原周缘冰川面积退缩明显(10%以上),雪线上升强烈,近 30 a 来雪线上升一般为 100~150 m,最大 350 m;腹地冰川面积少量减少(5%以下),雪线基

本平衡,局部有上升现象(0~50 m)。在全球加速变暖的背景下,高原现代冰川退缩有加速的趋势。根据高原各山系现代冰川退缩率的差异,将青藏高原现代冰川划分为重度退缩、中度退缩、轻度退缩和平衡稳定4种变化类型。其中,现代冰川面积变化率(减少) $\geq 15\%$ 以上的地区为现代冰川重度退缩区;10%~15%之间的地区为中度退缩区;5%~10%之间的地区为轻度退缩区;5%以下的地区为平衡稳定区。青藏高原现代冰川分区评价图如插页彩片28所示。

2.3 湖泊与湿地调查

河湖湿地是生态环境中的重要因子,其现状和变化直接影响和决定了生态环境的现状和变化趋势。青藏高原区内的湿地分布和变化一方面受区域环境乃至全球环境的变化而发生变化;另一方面由于高原区内特殊的地理环境,其变化又有特殊的规律。高原湿地变化引起的生态环境变化,对中国西部、三江源乃至全球环境又有明显的反馈作用。根据《湿地公约》湿地定义,湿地包括沼泽、泥炭地、湿草甸、湖泊、河流、滞蓄洪区、河口三角洲、滩涂、水库、池塘、水稻田以及低潮时水深浅于6 m的海域地带等。根据青藏高原湿地发育特点和本次调查工作的目的,参照前人湿地分类,将区内湿地分为河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地和人工湿地4大类。高原湖泊在我国湖泊组成当中占有非常重要的地位,且对于全球环境变化的响应更为迅速和敏感。考虑到湖泊在青藏高原生态环境中的特殊地位,将湖泊从湿地类型中单列出来进行调查和研究。

湖泊遥感调查表明,研究区内湖泊绝大部分为构造湖,包括特大型及大型湖泊。高原区内有较多的河成湖,是河流泛滥、淤积或改道等残留下的。高原冰川湖主要分布于藏东南喜马拉雅山脉和念青唐古拉山脉,少部分分布于西北部昆仑山。冰川湖分布的海拔一般较高,湖面积较小。区内大于 0.01 km^2 湖泊共有43 174个,湖泊总面积 $43 186 \text{ km}^2$ 。其中,大于 $1 000 \text{ km}^2$ 湖泊3个,大于 500 km^2 湖泊13个,大于 100 km^2 湖泊74个。近30 a来,湖泊总面积增加 $1 610 \text{ km}^2$,并表现出高原内部湖泊新生和扩张,高原周边湖泊消亡和萎缩的变化规律。湖泊动态变化扩大中心从高原东北部-东部-西南部-中西部迁移,缩小中心从中部向北部方向迁移。

青藏高原湿地(除湖泊以外的湿地)遥感调查表明,湿地主要分布在青海省境内的青海湖上游北部祁连山前、柴达木盆地格尔木市北部、澜长江源北部地区、四川省的若尔盖地区和西藏自治区羌塘高原南部和东部边缘。大部分为河流上游低洼部积水

而成的河流湿地,如若尔盖湿地和长江源湿地;还有的与湖泊萎缩有关,如柴达木盆地内的湿地。高原现有湿地总面积为 $88 715.5 \text{ km}^2$ 。从20世纪90年代到21世纪初近10多a来,虽然高原不同地区湿地动态变化以扩张湿地、稳定(未变化)湿地和萎缩湿地3种类型显示,但区内湿地总面积呈减少趋势,共减少了 $8 731.6 \text{ km}^2$,并表现为高原周边明显减少而高原内部略有增减的变化,其增加面积远远小于减少面积。青藏高原湿地动态变化如插页彩片29所示。

2.4 荒漠化调查

青藏高原荒漠化是中国荒漠化的重要组成部分,青藏高原荒漠化主要有砂砾质荒漠化土地(由砂砾石裸地、沙漠、重度沙漠化土地,中度沙漠化及轻度沙漠化土地组成)和盐碱质荒漠化土地(由盐漠,重度盐碱化土地、中度盐碱化土地及轻度盐碱化土地组成)2种类型。遥感调查结果显示,到21世纪初,荒漠化土地共计59万 km^2 ,占高原总面积的23%。其中,砂砾质荒漠化土地51万 km^2 ,占总面积的20%;盐碱质荒漠化土地8万 km^2 ,占总面积的3%。近30 a以来,高原荒漠化土地由20世纪70年代的57万 km^2 增长到了2000年左右的59万 km^2 ,总体面积增长了2万 km^2 ,其中盐碱质荒漠化土地减少了1.7万 km^2 ,由此表明高原砂砾质荒漠化增加幅度大于高原荒漠化增加的平均水平。

根据青藏高原33个地州(市)土地荒漠化加重面积的百分比,对高原荒漠化程度进行了分区评价,即:荒漠化剧烈加重区,加重面积百分比为由16.68%到18.97%;荒漠化显著加重区,加重面积百分比由9.08%到16.68%;荒漠化轻微加重区,加重面积百分比由1.06%到9.08%;荒漠化无加重区,加重面积百分比由0到1.06%,如插页彩片30所示。

3 结论

通过对青藏高原生态地质环境遥感调查与监测项目阶段性成果的综合性分析,得到的结论如下:

(1)利用卫星遥感技术首次开展了覆盖高原全域、多因子、多期次、综合性的调查与监测,取得的成果对我国社会经济可持续发展战略的制定和全球环境变化研究具有重要意义。

(2)青藏高原区内地形地貌是内外动力地质作用共同作用的结果。新构造运动决定了高原现代地貌和地形,不同级别和规模的构造控制了不同规模的地形和地貌单元,使青藏高原生态地质环境产生明显的地域分异,从而影响了高原气候、植被、河湖、冰川雪线等的分布和变化。

(3)青藏高原内外流水系格局、冰川分布、河湖演变及冰川雪线变化均与新构造运动形式密不可分,其不同特征受新构造运动形式影响明显。青藏高原的主要沉积作用发生在高原中西部,尤其是在伸展断拗区沉积作用更为广泛,东部以及周边挤压隆升区以河流的强烈下切侵蚀作用为特征,故青藏高原区域的生态地质环境在宏观特征上东西、腹地与周边地区截然不同,即高原东部以及周边区域是崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害密集发育区,腹地第四纪拗陷沉积区荒漠化灾害相对更为发育。

(4)高原现代冰川、湖泊湿地、荒漠化等生态地质环境因子对全球气候变化响应快速而明显,表现为冰川融化消退、雪线上升、湿地面积减少和荒漠化强度增加。近30 a来,高原普遍升温,其中高原北部地区比南部地区、高原周缘比腹地升温要明显得多;干湿变化区域间的差异明显,高原东北部青海地区变干,这种趋势在20世纪80年代中期以后尤为明显。高原现代冰川、湖泊湿地及荒漠化时空变化特征均表现出周缘与腹地、北部与南部、东部与西部间的差异。

(5)青藏高原综合评价结果表明,近30 a来青藏高原生态地质环境质量趋于变差。其中,腹地基本保持稳定而周缘地区变化明显;高原西部生态地质环境质量较差区因外部扰动小而基本保持稳定;东部生态地质环境质量优良区的变化存在南北分异现象,即高原东南部环境有所改善而东北部地区趋向于恶化;位于高原中部中央隆起带的高原生态地

质环境质量过渡区变化明显,表现在环境质量的下降和分布面积的减少上,这一条带与中央隆起带在空间位置上具有“一致性”,表明地学因素对于高原生态地质环境空间分布及其时空变化的制约作用,这一地区生态地质环境的脆弱性与敏感性决定了未来需要对其进行进一步的遥感调查与监测工作。

参考文献

- [1] 潘保田,李吉均. 青藏高原:全球气候变化的驱动力与放大器[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1996, 32(1): 108-115.
- [2] 施雅风,李吉均,李炳元,等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. 地理学报, 1999, 54(1): 10-21.
- [3] 郑度,姚檀栋,等. 青藏高原隆升与环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] Ruddiman W F, Prell W L, Raymo M E. Late Cenozoic Uplift in Southern Asia and the American West: Rationale for General Circulation Modeling experiments [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(D15): 18379-18391.
- [5] Ramstein G F, Fluteau F D, Besse J, et al. Effect of Orogeny, Plate Motion and Land-sea Distribution on Eurasian Climate Change Over the Past 30 Million Years [J]. Nature, 1997, 386: 788-795.
- [6] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China [J]. Nature, 2002, 416: 159-163.
- [7] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the HiMaBplaya-Tibetan Plateau Since Late Miocene Times [J]. Nature, 2001, 411: 62-66.
- [8] 李双成,郑度,张锦锂. 环境与生态系统资本价值评估的区域范式[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 270-275.

REMOTE SENSING SURVEY OF ECOLOGICAL AND GEOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL FACTORS IN QINHAI - TIBETAN PLATEAU

FANG Hong-bin¹, ZHAO Fu-yue¹, LU Yun-ge¹, ZHANG Rui-jiang¹,
ZHANG Zhen-de¹, SUN Yan-gui², JIANG Qi-gang³

- (1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;
2. Remote Sensing Center, Qinghai Institute of Geology Survey, Xining 810012, China;
3. Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The project of Remote Sensing Survey of Ecology, Geology and Environment in Qinghai - Tibet Plateau beginning in 2003 has made some achievements. Surveying results of some sub-projects such as Quaternary geology and Quaternary glaciers, modern glaciers, lakes, wetlands (except for lakes) and desertification are discussed in this paper. The importance of this project to the environmental protection of Qinghai - Tibet Plateau is emphasized, and the assessment results of environmental quality of the plateau are recounted. Geological factors have played a long-term role in the formation of environmental heterogeneity in the plateau, and controlled its evolution in the geological history. In the past 30 years, the global climate change and human activities have resulted in some adverse effects on the environmental factors and even the sustainable development of China.

Key words: Qinghai - Tibetan plateau; Remote sensing; Ecological environment; Assessment

第一作者简介: 方洪宾(1963-),男,教授级高工,主要从事航空航天遥感技术应用研究与管理工。

(责任编辑: 李 瑜)