

从地球系统科学角度浅析中国地貌 若干问题研究的新进展^{*}

杨小平^① 师长兴^② 李炳元^② 朱秉启^①

(①中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室,北京 100029;

②中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要 以地球系统中各圈层的相互作用为主线,分析总结了我国沙漠地貌过程、流水地貌过程、冰川地貌过程及风沙地貌过程等领域研究的部分进展。由于我国沙漠地理位置的特殊性,其形成和演变与岩石圈构造变动即青藏高原隆升有着紧密的联系,所以,对我国沙漠形成、演变的研究能为探讨青藏高原隆升历史提供重要佐证。近30年来,有关我国沙漠形成时代的认识更新较快。新的沉积记录显示,我国西北地区的沙漠在中新世时就已经出现了,但沙漠沙丘大规模扩展可能是在中更新世才开始的。即使在晚更新世以来,我国沙漠地区的气候也有过明显波动、沙漠地貌的特征也发生过显著变化。沙漠通过为沙尘暴提供物源,对全球变化产生驱动作用。从地表过程来看,风沙地貌的形成演变不仅受风力作用,而且受流水、湖泊等多种地貌动力过程的影响,地貌类型是各种动力过程共同作用的缩影。古冰川地貌曾是最早发现的第四纪气候变化的证据。随着新的测年技术的出现,学术界对我国第四纪古冰川地貌演化过程有了较系统、全面的认识。流水地貌过程应该是地球上作用区域最广的一种地貌动力过程,对流水地貌过程的认识目前正在向微观和宏观深入。

主题词 沙漠 地貌过程 全球变化 地貌学 地球系统科学

中图分类号 P931, P941.73 **文献标识码** A

1 引言

就我国的地貌学而言,通常人们认为公元前5至公元前3世纪的《禹贡》用文字最早记载了我国的地表形态。《禹贡》以自然实体(如山脉、河流)为标志,把我国分为9个区(“州”),并对每个区的河流、山脉、植被、土壤、物产、人口等给予了简要的描述。这应该也是全球范围内最早有关地貌的记载。

作为一门现代科学,地貌学的诞生则比《禹贡》中的记载要晚两千多年。在欧洲,学者们常把中国黄土风成说的最早提出者德国人F.李希霍芬誉为“地貌学之父”^[1,2],因为是他首先系统论述了内力和外力的地貌过程^[3]。在英、美等国也有人认为是美国地质学家W. McGee率先提出了地貌学的概念^[4],在W. McGee^[5]的眼里,地貌学是通过过去的侵蚀证据来重建地球历史的科学,是地质学的分支。F.李希霍芬和W. McGee都生活在一百多年前,这说明100多年前的地貌学家们就已经将地表过程和

地球历史作为地貌学的研究内容了。随着各国地貌学研究的不断深入,地貌学成为活跃于当今国际学术舞台的一门新型学科。自1985年以来,每四年一次的国际地貌大会已成为一种系列化的大型国际学术活动。近30年来,地貌学的理念和研究在一定程度上是与国际地貌学家协会(IAG)的引领分不开的。国际地貌学家协会(IAG)对地貌学也给出了自己的定义:“地貌学是对地形、景观及对塑造和改变地形、景观的地表过程开展多学科、系统研究的科学^[6]”。

目前学术界普遍认为,地球科学未来的发展趋势是地球系统科学,即把地球作为一个综合统一的自然和社会系统来研究,并把研究地球各圈层的基本过程与变化及其相互作用作为主要研究内容^[7]。仔细推敲后会不难发现,前面提到的地貌学的定义在很大程度上也都体现了地球系统科学的思想。地球系统科学思想的萌芽最早可能出现在地貌学的著作之中^[8]。李希霍芬在他的《科学旅行指南》^[2,3]中

第一作者简介:杨小平 男 44岁 研究员 环境与第四纪地质专业 E-mail: xpyang@263.com.cn; xpyang@mail.igcas.ac.cn

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KZCX2-YW-119)和国家自然科学基金项目(批准号:40671020和40425011)资助

2008-05-10 收稿,2008-05-20 收修改稿

写到：科学旅行者在涉足一片陌生区域时，映入其眼帘的首先是似乎稳定的各种类型的地表。地表上生成土壤，旅行者也是在这一层上行走，水体在地表流动，地表之上有大气在运动，影响生物界的诸多要素也都在这里显露出来，植物被固定，动物也离不了地表，人类也在其上建立聚居地。所以，地表形态和成分特征是认识所有其他地理现象的基础。在这里，F.李希霍芬强调了地貌学是其他地理学认识的核心这一观点，并讲述了其他诸要素与地表的依赖关系。

本文试图以认识各圈层相互间的作用为出发点，来分析我国地貌研究的一些进展。全面回顾和总结有关我国地貌研究的成果和进展并非一件容易的事。限于笔者水平，本文主要以沙漠研究为例，简要论述地貌与地球系统科学的联系，并从流水、冰川、风沙等动力过程出发，浅析地貌过程与环境演变的关系。

2 沙漠与地球系统

由于沙漠的形成和演变受沙源、风力以及地表植被覆盖率三大要素的直接控制，故沙漠是认识地球系统中各圈层相互作用规律的理想研究对象。

2.1 沙漠与岩石圈动力学

总体上来说，我国沙漠的形成与演变不仅受全球性的轨道尺度气候变化的影响，而且也受区域性构造尺度气候变化的制约。这里所指的构造尺度气候变化则主要受控于青藏高原隆升及其演化过程。青藏高原的隆升对其周边地区所产生的最突出的影响是我国西北及中亚地区干旱气候的形成^[9]。换言之，我国西北及中亚地区沙漠的形成与演变历史则是探讨青藏高原隆升历史及高原隆升的环境效应的重要佐证^[10-12]。“沙漠是干燥气候的产物”^[13]。前人的研究工作也显示，在青藏高原隆升之前，我国现今的北方干旱地区表现出半干旱的特征^[14]。青藏高原通过对印度季风系统和东亚季风系统的控制与影响进而对亚洲干旱地区环境产生重大影响。在印度季风演化的早期，青藏高原高度相对较低，尚不足以成为印度洋水汽进入塔里木盆地的巨大屏障，仅当青藏高原达到较高的高度时，才会完全阻碍印度洋的水汽。所以说，对我国沙漠地貌研究所获得的认识能为认识青藏高原隆升历史和研究岩石圈动力学做出巨大贡献。在这一点上，我国北方沙漠和地球上受副热带高压和冷流等控制的沙漠是不一样的。

由于直接从沙漠地区寻找能反映沙漠形成时期的地层剖面有较大的难度，沙漠的形成时期多是通过其边缘地区的粉尘沉积来推断的。例如，对塔克拉玛干沙漠的形成时间认识会因研究素材选择的不同而得出不同的结论：1)周廷儒^[15]认为昆仑山北坡广泛分布的黄土状亚砂土是中更新世的沉积，并与中更新世沙漠的大规模发展有关。2)朱震达等^[13]依据塔克拉玛干沙漠边缘地区河流阶地及冲积扇形成的时代，提出塔克拉玛干沙漠大规模发育的时代是中更新世。周廷儒^[15]和朱震达等^[13]所指的沙漠大规模发展的时间代表了沙漠大片沙丘的形成时间，但并未否认早些时候会有个别沙丘的存在。3)依据早第三纪时我国西北、华北、华中和东南沿海地区盛行行星风系控制的干旱气候，董光荣等^[16]认为，在早第三纪时期曾有一个斜贯中国中亚热带的红色沙漠带，晚第三纪时期这个红色沙漠范围缩小，位于秦岭以北、大兴安岭以西。4)认识我国沙漠的另一途径为黄河中游的风成黄土沉积。数十年来的研究也一再证实，我国黄土高原的黄土堆积和亚洲内陆的干旱化有着密切联系，亚洲内陆是我国黄土的主要物源区^[17]。近来也有研究显示，黄土高原东南部的黄土相当一部分来源于黄河河谷的流水沉积^[18]，但这只适用于东南部地区。对于黄土高原粉尘沉积的起始年代及沉积旋回的认识近些年来也有突出进展，以前人们认为这大约在2Ma前^[17]，后来向后推至7~8Ma前^[19]。依据在黄土高原西部地区找到的22Ma前的沉积证据来推断，亚洲内部的干旱化至少在22Ma前就已出现了^[20]。从黄土-沙漠沉积系统出发，有22Ma前的黄土，就应该有22Ma前的沙漠，那么，青藏高原在那时就应达到了相当高的位置。但高原的高度从沙漠的面貌来讲可能是经历了阶段性抬升的。例如，在黄土高原泾川、林台和白水三地的剖面上，粒度在2.55Ma和1.25Ma时发生突变，原因是受到区域动力即青藏高原抬升的影响，沙漠区域更加干旱化^[21]。

2.2 沙漠与古气候

我国黄土高原的黄土-古土壤序列被公认为是世界上最长、最连续的陆相古气候记录，也成为与冰芯、深海沉积相并列的古环境研究的三大支柱之一，并在第四纪气候变化的多旋回理论建立方面起到了关键作用。而对于黄土-古土壤序列古气候意义的解释则离不开对其源区沙漠环境的认识。沙漠对气候变化的重要性主要体现在两个方面：1)根据划分

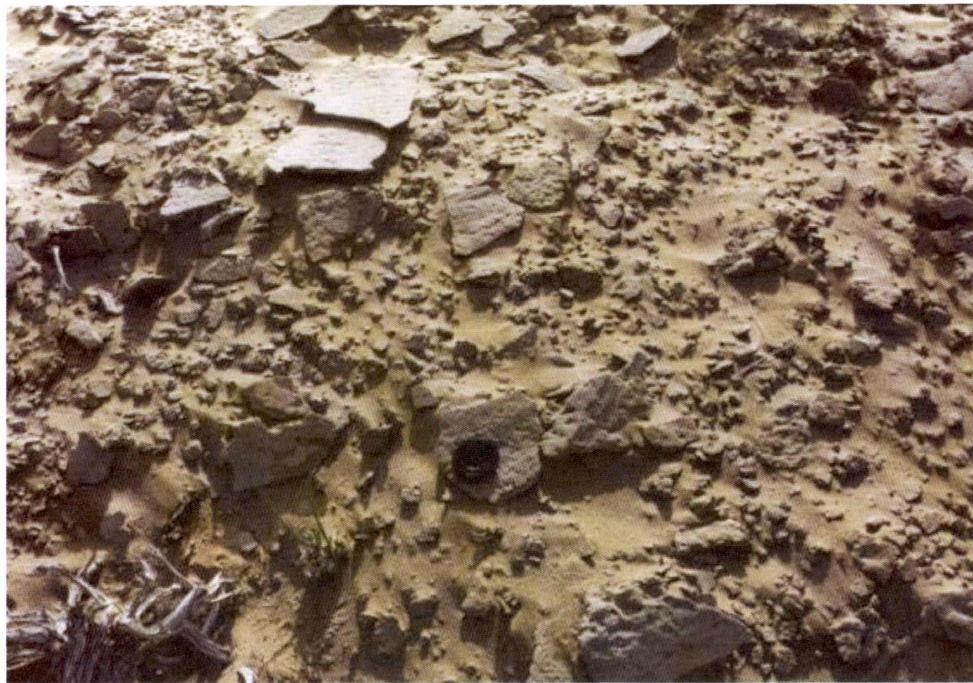


图1 巴丹吉林沙漠风成砂中残留的钙质胶结

Fig. 1 Remains of calcareous cementation in the aeolian sand of the Badain Jaran Desert



图2 塔克拉玛干沙漠中残留的湖相沉积

Fig. 2 Remains of lacustrine sediments in the Taklamakan Desert

标准的不同,以沙漠为代表性地貌类型的干旱地区和以沙地为代表性地貌类型的半干旱地区占地球陆地表面的30%至50%。所以,沙漠地区的气候记录对于掌握全球气候特征是不可缺少的,沙漠研究因而也是世界地学领域备受关注的问题。随着测年精度的不断提高,对沙漠地区的地貌演变历史的认识也在不断提高。2)沙漠地区植被覆盖的变化会改变水汽循环的规律,进而影响到沙漠本身及其邻近地区的气候。

在自然背景下,气候变干导致沙漠扩展,气候变湿使得沙漠缩小。因而,沙漠范围的变化指示了气候的演变历史。但从面上考察沙漠的空间、时间分布难度颇大,科学地运用沙漠边缘地区的地层剖面可为沙漠演变研究提供关键证据^[22-24]。例如,从毛乌素沙漠南缘靖边黄土-红粘土序列的粒度变化可以推断,在最近3.6 Ma以来毛乌素沙漠不仅随着全球冰期-间冰期气候变化而扩张或收缩,而且可能存在4次显著的大规模南扩,它们先后发生在约2.6 Ma, 1.2 Ma, 0.7 Ma和0.2 Ma前^[22]。沙漠扩展的时期也代表着干旱化的加强。

当然,来自沙漠本身的证据也是古气候研究领域关键内容。在我国的塔克拉玛干沙漠和巴丹吉林沙漠地区至今仍保留有钙质胶结层,这些钙质胶结层应是沙漠表面成土过程所形成的,代表了较湿润的气候时段。巴丹吉林沙漠钙质胶结层(图1)^[25]的¹⁴C年龄的测年结果约为31 ka和19 ka,说明该沙漠地区在晚更新世时至少有过两次比现代湿润的时期^[25]。在塔克拉玛干沙漠钙质胶结层的¹⁴C年龄约为28 ka^[26]。在塔克拉玛干沙漠腹地广泛分布有古湖相沉积(图2),利用光释光测年得出这些古湖相沉积的时代大约是40 ka, 30 ka和2 ka,说明大约在这些时期塔克拉玛干的腹地被湖泊所占据,沙丘暂时消失(图3)^[27]。但这里存在的问题是,至今人们尚未获得当时这些湖泊的准确面积。从风沙地貌上所看到的这一较湿润的古气候记录与其毗邻地区这一时期的古环境有共同点,例如,柴达木盆地的盐湖沉积中的介形类组合特征显示,在大约30 ka前该盆地的气候相对比较湿润^[28, 29]。

遥感数据的图像处理和野外考察说明,塔克拉玛干沙漠地区的水文格局曾发生过巨大变化,例如,尼雅河曾是克里雅河的一支支流^[30],而在现今,尼雅河的流程却很短,在沙漠南缘就已经干枯了。沙漠地区水文格局的变化无疑会导致风沙地貌格局的变化。尽管在长时间尺度上,我国北方在新生代时期经历了

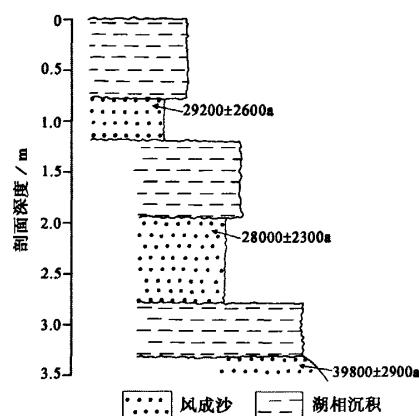


图3 塔克拉玛干沙漠腹地塔中风成沙剖面中

指示较湿润环境的古湖相沉积的光释光年龄^[27]

Fig. 3 OSL ages of the intercalated lacustrine sediments indicating wetter environments in the sequence of aeolian sands in the central Taklamakan Desert^[27]

总体上向干旱化的发展过程,但在短时间尺度上确有突变事件,并导致了区域景观的显著变化。

从地貌学证据分析来看,世界上许多沙漠在近代地质历史时期都曾经历了相对湿润的时期。例如,在末次冰期,非洲的纳米布沙漠^[31]、卡拉哈里沙漠^[32]、蒙古西部的沙漠^[33]都经历了相对湿润的时段。

对我国巴丹吉林沙漠地区丘间地湖泊古湖岸地貌与湖泊沉积的研究表明,巴丹吉林沙漠地区的湖泊在全新世发生过明显变化,在全新世早中期时,巴丹吉林沙漠湖广、水多,水份状况较好,湖盆周边的沙丘当时应是湖底。由于研究地区在总体上受东亚季风气候系统中的冬季风所控制,全新世早中期的湿润气候标志着来自海洋的夏季风强度的增加^[34]。这些沙漠湖岸地貌所反映的全新世气候特征与利用高分辨率研究方法在干旱地区的湖泊中所得到的认识^[35]总体上是一致的。

国外许多沙漠和沙地在全新世时期气候也是不稳定的。例如,印度塔尔沙漠的湿地在全新世经历了较明显的变化,有的干湖盆在全新世早中期(8.5~5.5 ka)时曾为永久性湖泊,之后变为季节性积水^[36]。撒哈拉沙漠东部地区因多年平均降雨量不足5 mm,是世界上最干旱的区域之一,目前,只有在能抽到深层地下水的地方才有居民点。但根据500多个¹⁴C测年数据显示^[37],在9.5~6.3 ka时,该区存在过一个较湿润的气候时段,那时地表流水较多,耐旱植物较发育。依靠地表水资源,当时不仅有

以打猎为生的游牧民,而且在生态条件好的地段还有饲养家畜的牧业和季节性居住的较大的居民点。

虽然在 22Ma 前我国西北地区可能已出现过沙漠,但沙漠内部特征及其边缘地区的沉积序列显示,沙漠的范围和特征在 22Ma 期间发生过变化。到目前为止,学术界对这些变化还缺乏详细的解剖。对于这些变化也存在诸多不同的解释,要有一个确切的答案,关键的是要弄清沙漠本身经历了哪些地貌过程和演变的历史。

2.3 沙漠与生物地球化学循环

近些年来,不少科学家都在探讨沙尘暴在地球系统中的作用问题。从短的时间尺度上讲,空气中的沙尘因吸收和扩散太阳辐射会对气温产生影响。而从长的时间尺度上看,沙尘暴的作用显得更为复杂。例如,亚洲北部地区沙尘暴出现频率较高,降落在冰川上的沙尘会减低冰面对太阳光的反射率、因而增加冰面温度。亚洲北部地区在末次冰盛期之所以没有形成大规模冰盖,其原因可能就是频繁的沙尘暴导致了冰面温度提高,使得冰川消融量较大^[38]。冰期-间冰期气候旋回的不对称性可能也起因于沙尘暴^[39]。沙尘暴是海洋中决定海洋生物

生产量的铁离子的主要来源^[40],海洋生物生产量的高低又会影响大气中 CO_2 的浓度,所以说,沙尘暴在地球系统中发挥着不可低估的作用。由于沙尘来源于干旱沙漠地区,下垫面性质对起沙起尘过程起着决定性作用,因此,沙漠地貌研究在这里有着举足轻重的地位。

通过给沙尘暴提供物源,沙漠起着调节和改变全球生物地球化学循环的作用,由此而成为全球气候变化的驱动力。就沙漠化过程所释放到大气中的 CO_2 量而言,不同学者发表的数据之间差别颇大。从对我国浑善达克沙地的研究情况来看,土壤沙化将导致地表有机碳含量下降,能使当地地表碳储量在几十年内减少 40% 以上(图 4)。但是这些碳大部分都被风力搬运到下风方向沉积下来,而并非释放到大气层中^[41]。所以,要真正定量认识沙漠、沙尘暴对全球生物地球化学循环的贡献与作用,还需对沙漠、沙地地表形态特征开展系统、全面的研究。

关于我国北方沙尘暴的沙尘物质的来源,学术界仍持有多种不同的看法,研究方法也可以说是多种多样。借助稀土元素分析,笔者曾对北京市区 2002 年和 2006 年出现的两次强沙尘暴的物源做过探讨。除了分析北京市区这两次强沙尘暴的降尘样

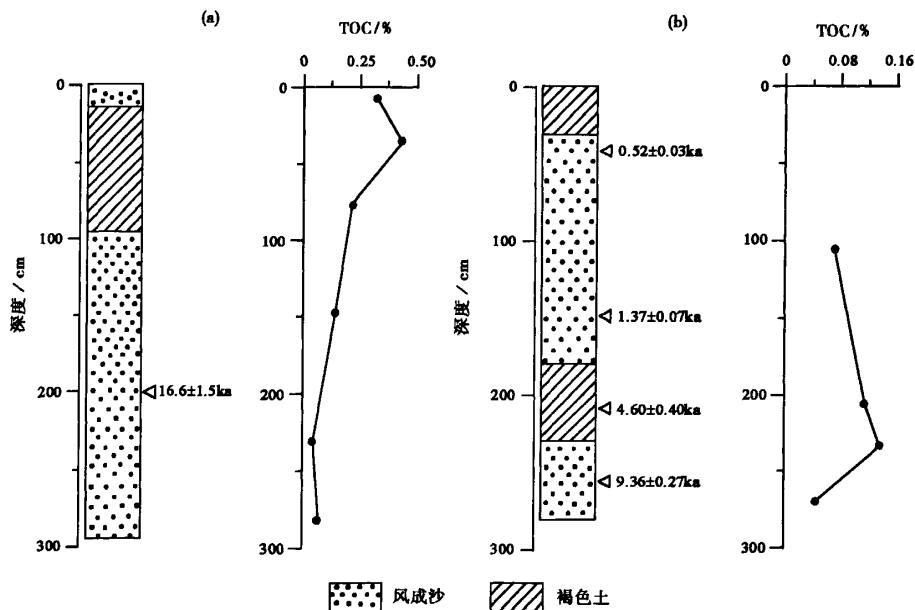


图 4 浑善达克沙地北部(a)和南部(b)沙丘剖面上风成沙与土壤层中的有机碳含量的差别

据文献[41]改编;年代由光释光方法测得

Fig. 4 The difference in organic carbon concentrations between aeolian sands and kastanozem soils in the northern (a) and southern (b) Hunshandake Sandy Land (Desertification will cause decrease in the organic carbon concentration on the earth surface. Chronology is based on OSL dating. Modified from the reference[41])

品之外,地表面物质样品则来自不同类型的风成地貌景观,如内蒙东部的浑善达克沙地及呼伦贝尔沙地、北京周边地区山间沟谷、凹地的风沙堆积(如天漠)、河北坝上地区的黄土及内蒙古西部的巴丹吉林沙漠。分析结果显示,这些样品在稀土元素含量、Eu和Ce的异常特征等方面都有明显的区别(图5)。元素的配分形式及Eu和Ce异常说明,北京周边地区(如天漠)的风沙物质不同于其北部地区的沙地和西部地区的沙漠,应为“就地起沙”,但是北京沙尘暴中的物质和我国西部干旱沙漠地区的样品有共同特点,说明这两次沙尘暴的物源主要来自我国西部的干旱地区^[42]。

已有研究证明,格陵兰冰芯中冰期时的沙尘来自亚洲^[43],那么,这些沙尘在离开源地后要跨越数个大陆和大洋才沉降下来。美国佛罗里达的土壤性质也受到了来自北非撒哈拉沙漠沙尘的影响^[44]。在全球范围内,主要的沙尘源都是年平均雨量不足

100mm的干旱地区^[45]。

3 地貌过程与环境演变

地球表面多种多样的地貌形态都是由特定的地貌过程或不同地貌过程的组合所塑造。可以说,岩石特征及地貌过程决定了一个地区的地貌类型。以驱动力不同,地貌过程可分为受构造运动所控制的内营力过程和受气候所控制的外营力过程。地貌过程是地球系统中各要素相互作用在地表的表现形式。

3.1 内营力过程

在新构造运动发生(3.4 Ma)之前,我国大陆地表是准平原景观,构造活动相对平静^[46]。而我国大陆以三大阶梯、多山、多盆地、多平原为突出特征的现今面貌则是与内营力地貌过程分不开的。随着观测、监测手段的改进,人们对内营力地貌过程的研究

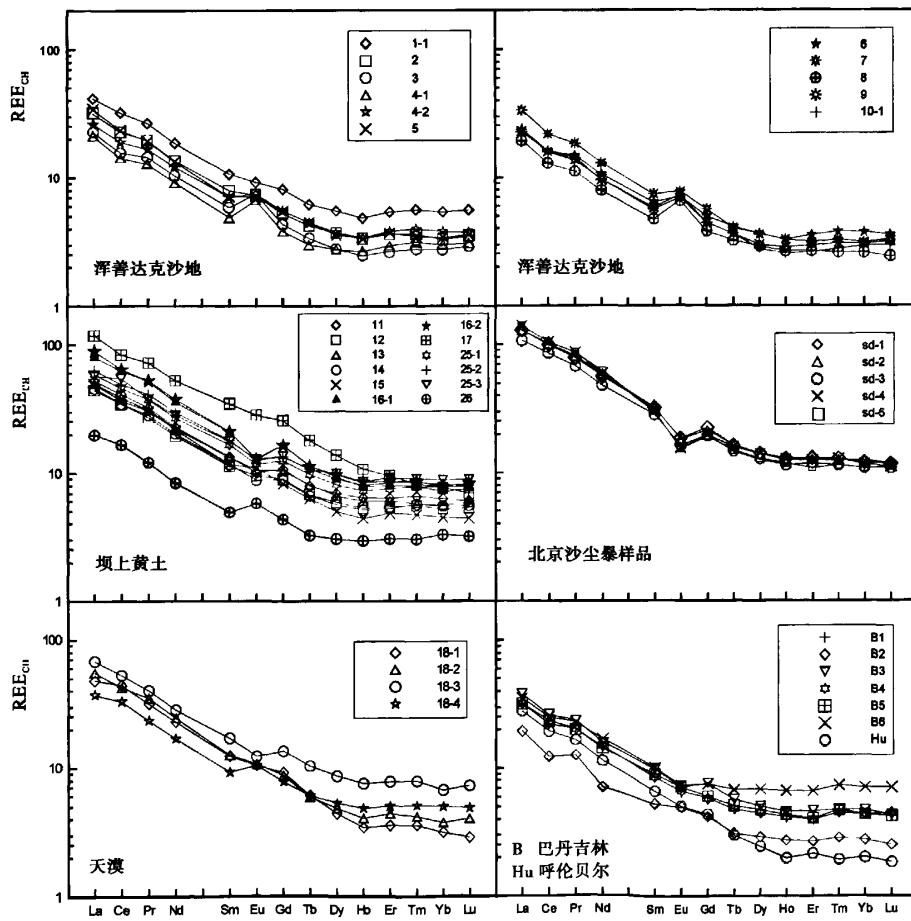


图5 我国北方地区地表样品与北京沙尘暴样品稀土元素配分模式^[42]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagram of surface sediments from Northern China and dust from Beijing^[42]

也不断深入。但在实际研究中常遇到的问题是山地抬升和气候变化均会导致河谷下切,侵蚀速率增加,沉积物颗粒变粗,究竟是哪个要素起主导作用,这仍需要具体问题具体分析。例如,有的学者认为昆仑山北麓3.5 Ma前出现的砾状沉积显示了青藏高原北部地区在上新世时期的快速抬升^[47]。但是对这一砾状沉积,似乎用气候变化也能解释^[48],即全球气候由约3~4 Ma年前的相对稳定趋势转变为不稳定、多变的演变模式。在气候长期稳定的状态下,地表景观会达到一种平衡状态,所以侵蚀和堆积速率都较小。而当气温、降水及植被处在快速多变的状态时,地表系统也处在转换状态,因系统难以达到稳定状态,所以侵蚀和堆积速率都较大^[48]。在本刊2008年第4期“地貌过程与环境演变”专辑发表的有关构造的文章中,雷永良等^[49]依据磷灰石裂变径迹提出东喜马拉雅构造结地区在更新世有两次抬升-剥露事件,提出青藏高原周缘隆起在更新世时期构造活动具有准时性的特征。师亚芹等^[50]研究证实即使沿断裂带分布的陡坎其成因可能也不完全是构造影响的,地表剥蚀过程会加大断层两侧的高差,所以在判断构造对地貌的作用时,还需要考虑外营力的叠加影响。

内营力地貌过程既是缓慢的,如山地抬升通常需要一定的时间,又会是突发的,如地震。地震会使地面出现断层和地裂缝,导致垂直错距和水平错距,引发山崩和滑坡等地貌灾害,造成房屋倒塌、道路坼裂、铁轨扭曲、桥梁折断等经济损失,甚至人员伤亡。

3.2 外营力过程

外营力地貌过程的能量主要来自太阳(图6),归纳起来看,最普遍的动力主要是流水、冰川、风和海浪,这些外力也时刻离不开地心引力的作用。除了这些自然营力之外,人也是地表形态的塑造者。

外营力地貌过程也可称为气候地貌过程,因为气候特征决定着一个区域外营力作用的特点。外营力地貌过程的演变代表了气候变化,正如现任国际地貌学家协会主席A. Goudie^[6]所强调的,地貌工作者在国际全球变化领域应发挥应有的关键作用。回顾起来,是地貌学家在世界上率先发现了第四纪气候的多变性,存在冰期-间冰期的巨大差别。这里指的是,德国地貌学家A. Penck和E. Brückner通过研究阿尔卑斯山麓和山前分布的河流阶地砾石层及冰川砾石层,认为冰川砾石层是冰川作用盛行期的沉积物,而阶地砾石层是河流侵蚀作用强烈期

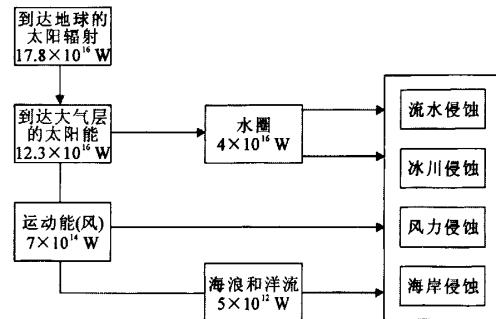


图6 侵蚀过程的能量的主要来源及能流^[51]

Fig. 6 Source and flow of energy available for erosional processes (data from reference[51])

的沉积物,提出冰川砾石层代表4次冰期,并分别以多瑙河的4条支流名称自老而新将四大冰期加以命名^[52]。

3.2.1 流水地貌过程

流水地貌过程涉及从坡面、沟谷和河床,到整个流域水系的形态结构在流水作用下的形成发育过程,大体可分为流域坡地过程和河床过程。流水地貌出现在各种气候带,其研究是深入认识地球表层系统中岩石圈、水圈和生物圈相互作用的关键。在社会对于环境保护,特别是全球变化下如何进行流域管理的需求下,随着系统理论与非线性理论分析方法和遥感、同位素测年、原型与模型实验以及计算机模拟等探测分析手段的广泛使用,与地貌学的其他分支一样,我国流水地貌研究从早期的定性描述,不断向定量化、向微观和宏观方向深入,许多方面都得到了不断发展。

流域坡地过程主要涉及坡地泥沙的侵蚀搬运过程,包括雨滴溅蚀、径流侵蚀、雨滴和径流搬运等水蚀过程,沟谷的发育和泥沙侵蚀过程,以及或多或少有水参与下的重力侵蚀过程。我国水土流失问题十分严重,坡地土壤侵蚀研究一直受到重视。近年来相关学者深入研究了不同时空尺度上影响土壤侵蚀各种要素在泥沙侵蚀和搬运的作用、土壤侵蚀过程中的复杂响应和临界现象、以及控制土壤侵蚀措施的减沙作用及生态与经济效益评价和措施的优化配置等问题^[53~55]。针对我国黄土高原独特的地貌环境特点,对高含沙水流产流、汇流特性及其与侵蚀产沙的关系以及多营力作用下的侵蚀搬运沉积复杂行为等问题做了开创性研究^[56,57]。流域过程研究进一步将各种泥沙侵蚀输移过程进行有机组合,由此,提出了大量经验性的、概念的或具有不同程度物理

机制的坡地和流域侵蚀产沙模型^[53,58]。

河床过程主要包括河道泥沙输移和河床演变。近年来,我国河流地貌研究结合社会需求,对许多科学问题展开深入研究,在河流历史演化过程和河床现代过程等方面取得了新进展。通过河流阶地研究揭示了黄河上中游河谷各段的发育历史^[59]。最近,借助新的光释光测年数据,界定了黄河山西河曲段的4级河流阶地的形成时间,并且分析认为只有最老一级是由于构造运动所造成的,其余3级均因气候变化而形成^[60]。对黄河在兰州的Ⅱ和Ⅲ级阶地的发育时间提出了新的看法,认为这些阶地的形成时间比较晚^[61]。系统研究了金沙江河谷贯通的时间,并给出了近百万年来河谷下切的速率变化过程^[62]。河床现代过程研究阐明了黄河、长江等河流河道泥沙输移规律与河床纵横剖面调整机理及临界、长江的河湖关系、宽含沙变幅挟沙水流及河床过过程复杂行为、水库下游与上游河床调整过程中的复杂响应现象、沙质和砾石质河床河型的统一判别关系、网状河流的发育特征及指标体系、人类活动和环境变化下河床调整等一系列问题,并且对泥沙运动和河床变形物理和数学模拟进一步完善^[63~67]。河床过程研究在防灾减灾中也发挥着重要作用。如调查研究了长江安徽段沿岸的崩塌,并对崩塌的原因给予了详细分析,提出了治理建议^[68]。近年来国际上特别注重河流地貌与生态学交叉,我国在这方面也有所进展。如研究揭示了水库上游河漫滩地生态系统影响下的河型转化问题^[63],调查分析了河流阶梯—深潭系统在保持河道稳定和维持生物多样性上的作用等^[69]。

流域产沙、输沙和堆积是流域内物质运动的主要形式,流域泥沙通量变化定量反映了流域演化的过程和强度。近年来,大量研究基于实际观测调查资料,从流域系统的不同层次,通过坡面和小流域土壤侵蚀实验观测、沟谷等侵蚀地貌发育过程的监测、河流水文泥沙观测资料的分析、利用塘库和流域中其他堆积区泥沙堆积过程反演流域泥沙侵蚀堆积历史等,结合泥沙概算方法,揭示出不同时空尺度下的流域侵蚀产沙历史变化过程及其与自然环境变化和人类活动的复杂关系。例如,建立了13000年以来黄河下游沉积速率随时间变化的曲线^[63],估算了全新世黄河上中游的年平均来沙量和人类活动对黄河年产沙量的贡献^[70],对长江上游近40年来河道泥沙存储量的计算定量揭示了主要自然和人为因素在河道泥沙存储、释放中的作用^[71]。随着不同自然背

景下及不同尺度下坡面与流域产沙和泥沙输移比样本的不断扩大,以及对侵蚀产沙影响要素及过程研究的逐渐深化,人们对流域产沙和泥沙输移比的尺度效应的认识更趋全面。

3.2.2 冰川地貌过程

中国是地球上中、低纬度地区现代山岳冰川最发育的国家,以青藏高原为主体的中国西部高山区分布广泛的冰碛、冰蚀丘陵和台地、槽谷和冰斗等类型多样的不同时期冰川地貌遗迹,包含着丰富的过去全球变化的信息。近100年(特别近30多年)来,国内外地理、地质工作者结合现代冰川,专门对第四纪冰川作用进行了研究。大量的第四纪冰川研究文献分别阐述了中国各地第四纪以来冰期和间冰期的气候变化及其遗留下来的地貌、沉积证据,其范围从喜马拉雅山至阿尔泰山、喀喇昆仑—昆仑山至横断山区、台湾雪山和东北长白山,以及全国各高山区。根据地貌部位所确定各次冰川作用的相对时间,据此所确定的冰川序列仍然是第四纪冰川最为基础的研究。由于气候的区域差异,在不同地点同一冰期时期发育大规模冰川的时间不一致。冰川性质(海洋性、大陆性)以及后期冰进规模如果比早期大,早期冰期遗迹将被破坏等因素,冰川的进退在地貌和沉积上留下的可能是断简残章。因此,依此来恢复古冰川旋回系列是较为困难的。自然不乏对一些地区古冰川遗迹的可靠性及其规模存在争论^[72~74]。然而确切的冰川遗迹,仍是重要气候事件的可靠标志。

施雅风^[72]主编的《中国第四纪冰川与环境变化》,引用了近千篇文献,全面系统地总结了相关研究进展,对国内外学者关注的中国第四纪冰川遗迹、冰期划分、冰川环境等进行了全面而系统的研究总结。李炳元等通过对青藏高原和全国的第四纪冰川遗迹实地考察、相关文献和遥感影像的综合研究,以冰川地貌遗迹为依据、较大比例尺的典型区第四纪冰川图为先导,编制出版了《青藏高原第四纪冰川遗迹分布图》^[75],和《中国第四纪冰川图(1:500万)》^[76],显示了青藏高原与中国第四纪时期冰川分布范围,重建了末次冰期雪线高度。古雪线分布与高原大地貌和气候组合密切相关,高原外围与高原内部存在巨大差异;高原上古、今雪线的分布均为同心圆式的穹隆状,即高原边缘山地因气候相对湿润而雪线下降值大,但高原内部则因气候干燥而雪线下降值小,各地末次冰期与现代雪线高差自高原西北腹地为100~300m,至东南部和边缘山地一

般达 500~800m,最大可超过 1000m 以上。在末次冰期时,青藏高原还存在大量湖泊及多年冻土存在标志的“冰(砂)楔假型”。这些也从一个侧面否定了青藏高原存在连续的大冰盖的假说。中国东部第四纪冰川遗迹仅分布于秦岭太白山、台湾雪山和玉山以及东北长白山等少数海拔 3500~2500m 以上的亚高山^[72,77]。

冰期的划分是冰川地貌演化与全球变化对比的关键问题,因冰期划分长期停留于各次冰川作用的相对时间,而缺少绝对定年数据,往往难于开展可靠的冰期对比。由于 ¹⁴C、热释光(TL)以及电子自旋共振法(ESR)、光释光(OSL)法、宇宙射线方法(CRN)等技术开始应用于冰川沉积测年,国内外的古冰川年代学的研究均有相当进展,取得了一批冰碛物的年代证据^[78~81]。光释光和宇宙射线测年数据显示,喜马拉雅山和兴都库什山的古冰川在末次冰盛期(LGM)时冰川规模不大,倒是在 MIS 3 即间冰段(约为 30~60ka)冰进最大^[81]。说明降水量在冰川发育中有巨大意义,可能符合亚洲季风区气候的特点。然而,不少资料证明,一些地方仍然是在 LGM 时冰川范围最大^[72],可见区域气候的差异影响之巨大。

对于我国东部(如庐山)的古冰川问题在学术界曾有过完全不同的观点^[72,82]。近年来媒体时而还有关于在福建、广东等地发现古冰川遗迹的新闻报道。但是对庐山及我国东部海拔 2000m 以下的一些貌似古冰川作用的地形用其他非冰川地貌过程解释更合理^[72],所以,对古冰川遗迹的确定还需要结合古气候研究的结果加以综合分析。

3.2.3 风沙地貌过程

干旱区地貌过程的研究是针对不同的时间、空间尺度展开的。近年来流水和湖泊在干旱地区的作用已不断受到重视^[83]。正如在前面所提到的,沙源、风力以及地表植被覆盖率都对沙漠形成、发育产生决定性影响。我国北方地区沙漠的沙源多来自流水沉积^[13]、湖泊沉积^[25]和冰水沉积^[26],所以可以认为,风沙地貌是多种地貌过程共同作用的产物。由于风沙地貌过程仅在裸露及干燥的沙地上才能充分发挥优势,随着植被状况的改善,风对地表的塑造能力明显减弱。风沙地貌过程作用强度的变化反映了环境条件的改变,古沙丘通常是气候干旱化、植被退化的标志,而沙丘上的古土壤则是环境向湿润方向转变的信号^[24,41]。例如,巴丹吉林沙漠东侧的古沙丘的热释光年龄约为 51ka,指示那时巴丹吉林沙

漠的东缘更偏东一些,当时的气候比现今还干旱^[84]。在塔克拉玛干沙漠的克里雅河下游地区,沙丘在向东的运动中,迫使河流向东改道^[85],这可看作是风沙地貌过程改变流水地貌过程的一个实例。

沙漠地区的地貌过程,在短尺度上,就沙粒起跳、风沙运动规律、风沙流的输沙率等问题的研究已取得了不少进展^[86~88]。在中尺度上,沙漠、沙丘数 10 年的移动趋势,及沙漠化、土地退化问题是学术界及社会普遍关注的问题,几十年来沙漠研究者结合国家生态环境安全做了大量实地考察和定点观测研究^[86~89]。近年来,沙丘移动规律再度成为学术界的热点问题,物理模拟显示,单个新月型沙丘在运动过程中有可能是整体前移^[90],沙丘移动速度与其大小成反比^[88,90]。但野外实验说明,沙丘在运动过程中形状、大小都会改变^[91]。

在长尺度上,干旱沙漠地区地表形态和沉积所显示的气候的不稳定性在沙漠腹地及周边地区的湖相沉积中也得到了证实。例如,在巴丹吉林沙漠东缘的树贵湖,全新世时期湖泊作用过程和风沙作用过程曾发生过快速交替(图 7)^[92]。与之相类似,巴丹吉林沙漠腹地的丘间凹地自晚更新世以来也经历了湖泊、风沙两种不同动力的塑造^[84]。沙漠周边地区湖相沉积的研究使我们对我国西北地区环境演变历史有了深入的认识。罗布泊因其特殊的地理位置而备受关注。它可能在早更新世成湖,那时气候还是比较湿润的^[93,94]。罗布泊北部洼地中近 20ka 以来的湖相沉积中的石膏矿物的质谱-铀系测年、总有机碳含量及其同位素组成和 C/N 比值表明,该区的气候在近 20ka 中也发生过多次明显的变化,寒冷时期比较湿润,温暖时期比较干旱,该区的干旱化可能是受全球 CO₂ 浓度的增加所制约^[95]。根据历史文献资料分析判断,近两千年,位于沙漠东侧的罗布泊的水域面积在自然背景下也发生过巨大变化^[30]。位于北疆东部的巴里坤湖的全新世沉积的物理、化学特征也说明,新疆全新世时期的气候是多变的,冷干、暖湿、凉湿、暖干的时期都曾出现过^[96]。从具体的研究实例中可以看出,干旱地区的地貌过程不仅是风力作用的结果,流水、湖泊过程都在干旱景观环境的塑造中发挥着巨大作用与影响。

4 结语

从学科的发展历史、研究内容来看,地貌学对于认识地球表层过程和地球系统中岩石圈、大气圈、水圈和生物圈的相互作用有着关键的地位,因此,地

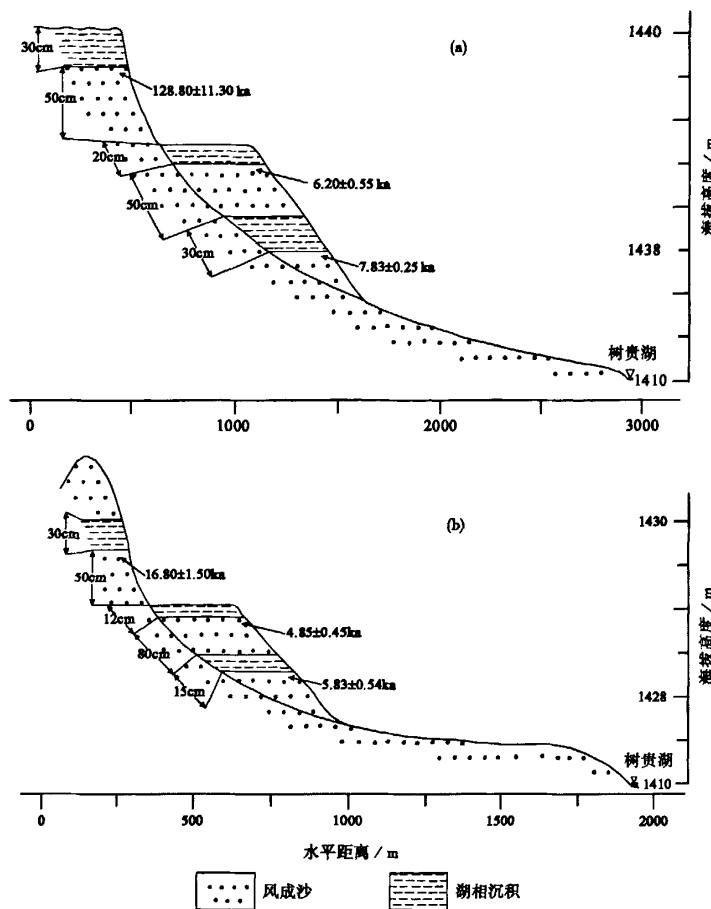


图 7 巴丹吉林沙漠东缘树贵湖湖岸两剖面上的湖泊与风沙作用频繁交替的遗迹^[92]

两剖面来自同一湖泊的不同部位,由于后期的风蚀作用,地层保存不连续,但从比较两剖面的高程、年龄可以看出,在全新世时期,这一湖泊水位有过 4 次大的波动,风沙和湖泊作用交替频繁;年龄通过热释光测得

Fig. 7 Evidence of frequent changes between lacustrine and aeolian processes occurring in the two profiles along the shorelines around Shugui Lake in the eastern margin of the Badain Jaran Desert^[92]

貌学应是地球系统科学的核心分支。内营力地貌过程主要受地球构造运动的制约,外营力地貌过程则主要受气候特征的控制,而地貌类型及其演变则受内营力地貌过程和外营力地貌过程的共同作用与影响,地貌过程演变所遗留的证据是环境变化的可靠记录。所以,地貌学能为探究地球构造运动与气候的相互作用提供最重要、最直观的佐证。作为地球上广泛分布的一种地貌类型的沙漠,虽然在不同地区会有不同的成因,但由于是沙尘暴的主要源区,沙漠通过影响全球的地球化学循环而对气候演变的驱动力产生影响。在亚洲中纬度地区,沙漠的形成、演化历史因与青藏高原的隆升过程紧密相连,所以,我国沙漠对认识岩石圈地壳变动有着重要的指示意义。

参考文献(References)

- 1 刘东生. 李希霍芬和“中亚人与环境”. 第四纪研究, 2005, 25 (4): 405 ~ 408
Liu Tungsheng. Ferdinand von Richthofen and “Man and Environment in Central Asia”. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(4): 405 ~ 408
- 2 杨小平. 李希霍芬地貌学思想在德国的继承与发展. 第四纪研究, 2005, 25 (4): 432 ~ 437
Yang Xiaoping. The succession and development of Ferdinand von Richthofen's geomorphological thoughts in Germany. *Quaternary Sciences*, 2005, 25 (4): 432 ~ 437
- 3 Richthofen F. *Führer für Forschungsreisende-Anleitung zu Beobachtungen über Gegenstände der physischen Geographie und der Geologie*. Berlin: Oppenheim, 1886. 7
- 4 Goudie A. *Encyclopedia of Geomorphology*. London: Routledge, 2004. xxii
- 5 McGee W. The Pleistocene history of northeastern Iowa. *Eleventh*

- Annual Report of the US Geological Survey, 1891, 11: 189 ~ 577
- 6 http://www.geomorph.org. Visited in March 2008
- 7 国家自然科学基金委员会地球科学部. 21世纪初地球科学战略重点. 北京: 中国科学技术出版社, 2002. 6
- Earth Sciences Division of the National Natural Science Foundation of China. Strategically Important Fields in the Earth Sciences in the Early 21st Century. Beijing: China Sciences and Technology Press, 2002. 6
- 8 Jakel D. 李希霍芬对中国地质和地球科学的贡献. 第四纪研究, 2005, 25(4): 409 ~ 431
- Jakel D. Ferdinand von Richthofen's contributions to Chinese geology and geosciences. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(4): 409 ~ 431
- 9 Manabe S, Terpstra T B. The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31(1): 3 ~ 42
- 10 郑度. 青藏高原对中国西部自然环境地域分异的效应. 第四纪研究, 2001, 21(6): 484 ~ 489
- Zheng Du. Qinghai-Xizang Plateau and its effects on regional differentiation of physical environments in West China. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 484 ~ 489
- 11 李吉均, 方小敏, 潘保田等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381 ~ 391
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 381 ~ 391
- 12 郭正堂, 彭淑贞, 郝青振等. 晚第三纪中国西北干旱化的发展及其与北极冰盖形成演化和青藏高原隆升的关系. 第四纪研究, 1999, (6): 556 ~ 567
- Guo Zhengtang, Peng Shuzhen, Hao Qingzhen et al. Late Tertiary development of aridification in North Western China: Link with the arctic ice-sheet formation and Tibetan uplifts. *Quaternary Sciences*, 1999, (6): 556 ~ 567
- 13 朱震达, 吴正, 刘恕等. 中国沙漠概论(修订版). 北京: 科学出版社, 1980. 8 ~ 12
- Zhu Zhenda, Wu Zheng, Liu Shu et al. An outline of Chinese deserts (revised edition). Beijing: Science Press, 1980. 8 ~ 12
- 14 Liu Tungsheng, Guo Zhengtang. Geological environments in China and global change. 见: 安芷生主编. 刘东生文集. 北京: 科学出版社, 1997. 192 ~ 202
- Liu Tungsheng, Guo Zhengtang. Geological environments in China and global change. In: An Zhisheng ed. Selected Works of Liu Tungsheng. Beijing: Science Press, 1997. 192 ~ 202
- 15 周廷儒. 新疆第四纪陆相沉积的主要类型及其和地貌气候发展的关系. 地理学报, 1963, 29(2): 109 ~ 129
- Zhou Tingru. The main types of Quaternary terrestrial deposits in Xinjiang and their relationships with changes of landforms and climate. *Acta Geographica Sinica*, 1963, 29(2): 109 ~ 129
- 16 董光荣, 李森, 李保生等. 中国沙漠形成演化的初步研究. 中国沙漠, 1991, 11(4): 23 ~ 32
- Dong Guangrong, Li Sen, Li Baosheng et al. A preliminary study on the formation and evolution of deserts in China. *Journal of Desert Research*, 1991, 11(4): 23 ~ 32
- 17 Liu Tungsheng. Loess and the Environment. Beijing: China Ocean Press, 1985. 1 ~ 251
- Jiang Fuchu, Fu Jianli, Wang Shubing et al. Formation of the Yellow River, inferred from loess-palaeosol sequence in Mangshan and lacustrine sediments in Sanmen Gorge, China. *Quaternary International*, 2007, 175(1): 62 ~ 70
- 19 Ding Z L, Rutter N W, Sun J M et al. Re-arrangement of atmospheric circulation at about 2.6 Ma over Northern China: Evidence from grain size records of loess-palaeosol and red clay sequences. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(6): 547 ~ 558
- 20 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. *Nature*, 2002, 416: 159 ~ 163
- 21 Xiong S F, Ding Z L, Jiang W Y et al. Damped fluctuations in Chinese loess grain size. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19): 2007
- 22 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L et al. Stepwise expansion of desert environment across Northern China in the past 3.5 Ma and implication for monsoon evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(1 ~ 2): 45 ~ 55
- 23 孙继敏, 刘东生, 丁仲礼等. 五十万年来毛乌素沙漠的变迁. 第四纪研究, 1996, (4): 359 ~ 367
- Sun Jimin, Liu Tungsheng, Ding Zhongli et al. The Mu Us desert evolution in the last 0.5 Ma. *Quaternary Sciences*, 1996, (4): 359 ~ 367
- 24 董光荣. 中国沙漠形成演化、气候变化与沙漠化研究. 北京: 海洋出版社, 2002. 1 ~ 734
- Dong Guangrong. Studies on Deserts' Formation and Evolution, Climate Changes and Desertification in China. Beijing: China Ocean Press, 2002. 1 ~ 734
- 25 杨小平. 近3万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化. 科学通报, 2000, 45(4): 428 ~ 434
- Yang Xiaoping. Landscape evolution and precipitation changes in the Badain Jaran Desert during the last 30000 years. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1042 ~ 1047
- 26 Yang Xiaoping, Zhu Zhenda, Jaekel D et al. Late Quaternary palaeoenvironment change and landscape evolution along the Keriya River, Xinjiang, China: The relationship between high mountain glaciation and landscape evolution in foreland desert regions. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 155 ~ 166
- 27 Yang Xiaoping, Preusser F, Radtke U. Late Quaternary environmental changes in the Taklamakan Desert, Western China, inferred from OSL-dated lacustrine and aeolian deposits. *Quaternary Sciences Reviews*, 2006, 25(9 ~ 10): 923 ~ 932
- 28 张虎才, 王强, 彭金兰等. 柴达木察尔汗盐湖贝壳堤剖面介形类组合及其环境意义. 第四纪研究, 2008, 28(1): 103 ~ 111
- Zhang Huacai, Wang Qiang, Peng Jinlan et al. Ostracod assemblages and their paleoenvironmental significance from shell bar section of paleolake Qarhan, Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(1): 103 ~ 111
- 29 Zheng Mianping, Yuan Heran, Liu Junying et al. Sedimentary characteristics and paleoenvironmental records of Zabuye Salt Lake, Tibetan Plateau, since 128 ka BP. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2007, 81(5): 861 ~ 874
- 30 Yang X, Liu Z, Zhang F et al. Hydrological changes and land degradation in the southern and eastern Tarim Basin, Xinjiang, China. *Land Degradation & Development*, 2006, 17(4): 381 ~ 392
- 31 Srivastava P, Brook G, Marais E. A record of fluvial aggradation in the northern Namib Desert during the Late Quaternary. *Zeitschrift für*

- Geomorphologie*, 2004, 133 (Suppl.): 1 ~ 18
- 32 Thomas D S G, Brook G, Shaw P et al. Late Pleistocene wetting and drying in the NW Kalahari: An integrated study from the Tsodilo Hills, Botswana. *Quaternary International*, 2003, 104 (11): 53 ~ 67
- 33 Grunert J, Lehmkuhl F, Walther M. Paleoclimatic evolution of the Uvs Nuur Basin and adjacent areas (Western Mongolia). *Quaternary International*, 2000, 65/66: 171 ~ 192
- 34 杨小平. 巴丹吉林沙漠腹地湖泊的水化学特征及其全新世以来的演变. *第四纪研究*, 2002, 22 (2): 97 ~ 104
Yang Xiaoping. Water chemistry of the lakes in the Badain Jaran Desert and their Holocene evolutions. *Quaternary Sciences*, 2002, 22 (2): 97 ~ 104
- 35 Chen Fahu, Yu Zicheng, Yang Meilin et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27 (3 ~ 4): 351 ~ 364
- 36 Deotare B C, Kajale M D, Rajaguru S N et al. Palaeoenvironmental history of Bap-Malar and Kanod playas of western Rajasthan, Thar Desert. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Earth and Planetary Sciences*, 2004, 113 (3): 403 ~ 425
- 37 Bubenzer O, Besler H, Hilgers A. Filling the gap: OSL data expanding ¹⁴C chronologies of Late Quaternary environmental change in the Libyan Desert. *Quaternary International*, 2007, 175: 41 ~ 52
- 38 Krinner G, Boucher O, Balkanski Y. Ice-free glacial northern Asia due to dust deposition on snow. *Climate Dynamics*, 2006, 27 (6): 613 ~ 625
- 39 Bar-Or R, Erlick C, Gildor H. The role of dust in glacial-interglacial cycles. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27 (3 ~ 4): 201 ~ 208
- 40 Mahowald N M, Baker A R, Bergametti G et al. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19: GB4025
- 41 Yang X, Zhu B, Wang X et al. Late Quaternary environmental changes and organic carbon density in the Hunshandake Sandy Land, Eastern Inner Mongolia, China. *Global and Planetary Change*, 2008, 61 (1 ~ 2): 70 ~ 78
- 42 Yang Xiaoping, Liu Yongsheng, Li Chaozhu et al. Rare earth elements of aeolian deposits in Northern China and their implications for determining the provenance of dust storms in Beijing. *Geomorphology*, 2007, 87 (4): 365 ~ 377
- 43 Svensson A, Biscaye P E, Grousset F E. Characterization of late glacial continental dust in the Greenland Ice Core Project ice core. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (D4): 4637 ~ 4656
- 44 Muhs D R, Budahn J R, Prospero J M et al. Geochemical evidence for African dust inputs to soils of western Atlantic islands; Barbados, the Bahamas and Florida. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: F02009
- 45 Goudie A S, Middleton N J. Saharan dust storms: Nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 2001, 56 (1 ~ 4): 179 ~ 204
- 46 李祥根. 中国新构造运动概论. 北京: 地震出版社, 2003. 1 ~ 424
Li Xianggen. An Outline of Neotectonics in China. Beijing: Seismological Press, 2003. 1 ~ 424
- 47 Zheng Hongbo, Powell C M, An Zhisheng et al. Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau. *Geology*, 2000, 28 (8): 715 ~ 718
- 48 Zhang Peizhen, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2 ± 4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates. *Nature*, 2001, 410: 891 ~ 897
- 49 雷永良, 钟大赉, 季建清等. 东喜马拉雅构造带更新世两期抬升 - 剥露事件的裂变径迹证据. *第四纪研究*, 2008, 28 (4): 584 ~ 590
Lei Yongliang, Zhong Dalai, Ji Jianqing et al. Fission track evidence for two Pleistocene uplift-exhumation events in the Eastern Himalayan Syntaxis. *Quaternary Sciences*, 2008, 28 (4): 584 ~ 590
- 50 师亚芹, 冯希杰, 戴玉强等. 临潼 - 长安断裂带所在陡坎的成因分析. *第四纪研究*, 2008, 28 (4): 721 ~ 732
Shi Yaqin, Feng Xijie, Dai Wangqiang et al. Cause analysis of the scarps on Lintong-Changan fault zone. *Quaternary Sciences*, 2008, 28 (4): 721 ~ 732
- 51 Summerfield M. Global Geomorphology. Harlow: Longman, 1991. 21
- 52 Penck A, Brückner E. Die Alpen im Eiszeitalter, 3 Bände. Leipzig: Tauchnitz, 1901 ~ 1909. 1 ~ 1199
- 53 唐克丽编著. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004. 1 ~ 845
Tang Keli ed. Soil and Water Conservation in China. Beijing: Science Press, 2004. 1 ~ 845
- 54 景可, 卢金发, 梁季阳等编著. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 1 ~ 154
Jing Ke, Lu Jinfa, Liang Jiyang et al. eds. Characteristics and Changing Tendency of the Erosional Environment in the Middle Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1997. 1 ~ 154
- 55 Chen Hao, Zhou Jinxing, Cai Qiangguo et al. Thresholds of geographic environmental elements in sediment yield of drainage basins. *Science in China (Series D)*, 2005, 48 (2): 230 ~ 240
- 56 Xu Jiongxin. A study of physico-geographical factors for formation of hyperconcentrated flows in the Loess Plateau of China. *Geomorphology*, 1998, 24 (2 ~ 3): 245 ~ 255
- 57 Xu Jiongxin. Hyperconcentrated flows as influenced by coupled wind-water processes. *Science in China (Series D)*, 2005, 48 (11): 1990 ~ 2000
- 58 蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展. 地理科学进展, 2003, 22 (3): 242 ~ 250
Cai Qiangguo, Liu Jigen. Evolution of soil erosion models in China. *Progress in Geography*, 2003, 22 (3): 242 ~ 250
- 59 刘志杰, 孙永军. 青藏高原隆升与黄河形成演化. 地理与地理信息科学, 2007, 23 (1): 79 ~ 83
Liu Zhijie, Sun Yongjun. Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and formation, evolution of the Yellow River. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23 (1): 79 ~ 83
- 60 邱维理, 张家富, 周力平等. 山西河曲黄河阶地序列初步研究. *第四纪研究*, 2008, 28 (4): 544 ~ 552
Qiu Weili, Zhang Jiafu, Zhou Liping et al. Preliminary study of the terrace sequence of the Huanghe River in Hequ area, Shanxi, China. *Quaternary Sciences*, 2008, 28 (4): 544 ~ 552
- 61 王萍, 蒋汉朝, 袁道阳等. 兰州黄河Ⅱ和Ⅲ级阶地的地层结构、年龄及环境意义. *第四纪研究*, 2008, 28 (4): 553 ~ 563
Wang Ping, Jiang Hanchao, Yuan Daoyang et al. Stratigraphic structures and ages of the second and third fluvial terraces along the bank of Huanghe River in Lanzhou Basin, Western China, and their environmental implications. *Quaternary Sciences*, 2008, 28 (4): 553 ~ 563
- 62 杨达源, 韩志勇, 葛兆帅等. 金沙江石鼓 - 宜宾河段的贯通与深

- 切地貌过程的研究. 第四纪研究, 2008, 28(4): 564~568
 Yang Dayuan, Han Zhiyong, Ge Zhaochuai et al. Geomorphic process of the formation and incision of the section from Shigu to Yibin of the Jinshajiang River. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 564~568
- 63 许炯心著. 中国江河地貌系统对人类活动的响应. 北京: 科学出版社, 2007. 1~340
 Xu Jiongxin. *Responses of River Systems in China to Human Activities*. Beijing: Science Press, 2007. 1~340
- 64 Shi Changxing. Causes for continuous siltation of the lower Yellow River. *Geomorphology*, 2005, 68(3~4): 213~223
- 65 胡春宏著. 黄河水沙过程变异及河道的复杂响应. 北京: 科学出版社, 2004. 1~448
 Hu Chunhong. Changes in Water Discharge and Sediment Load of the Yellow River and Complex Response in River Channel Adjustment. Beijing: Science Press, 2004. 1~448
- 66 李义天, 邓金运, 孙昭华等著. 河流水沙灾害及其防治. 武汉: 武汉大学出版社, 2004. 1~284
 Li Yitian, Deng Jinyun, Sun Zhaohua et al. *Disasters Related to Water and Sediment of Rivers and Management*. Wuhan: Wuhan University Press, 2004. 1~284
- 67 王随继. 网状河流的构型、流量—宽深比关系和能耗率. 沉积学报, 2003, 21(4): 565~570
 Wang Suiji. Architectures, relationships between discharges and width/depth ratios of stream cross profiles, and stream powers of anastomosing rivers. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 565~570
- 68 李长安, 杨则东, 鹿献章等. 长江皖江段岸崩特征、形成机理及治理对策. 第四纪研究, 2008, 28(4): 578~583
 Li Chang'an, Yang Zedong, Lu Xianzhang et al. Bank collapse characteristics, formation mechanism, and countermeasures of the Changjiang River in Anhui Province. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 578~583
- 69 王兆印, 程东升, 何易平等. 西南山区河流阶梯—深潭系统的生态学作用. 地球科学进展, 2006, 21(4): 409~416
 Wang Zhaoyin, Cheng Dongsheng, He Yiping et al. A study of the ecological functions of step-pool system in southwest mountain streams. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(4): 409~416
- 70 Shi Changxing, Zhang Dian, You Lianyuan. Changes in sediment yield of the Yellow River basin of China during the Holocene. *Geomorphology*, 2002, 46(3~4): 267~283
- 71 许炯心. 长江上游屏山至宜昌河道泥沙存贮量的变化及其地貌学意义. 第四纪研究, 2008, 28(4): 569~577
 Xu Jiongxin. Variation in channel sediment storage in the section between Pingshan and Yichang of the upper reaches of Changjiang River and some geomorphic implications. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 569~577
- 72 施雅风主编. 中国第四纪冰川与环境变化. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2006. 1~618
 Shi Yafeng ed. *The Quaternary Glaciations and Environmental Variations in China*. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Publishing, 2006. 1~618
- 73 Kuhle M. Subtropical mountain-and highland-glaciation as ice age triggers and the waning of the glacial periods in the Pleistocene. *GeoJournal*, 1987, 14(4): 393~421
- 74 刘东生, 张新时, 熊尚发等. 青藏高原冰期环境与冰期全球降温. 第四纪研究, 1999, (5): 385~396
 Liu Tungsheng, Zhang Xinshi, Xiong Shangfa et al. Qinghai-Xizang Plateau glacial environment and global cooling. *Quaternary Sciences*, 1999, (5): 385~396
- 75 李炳元, 李吉均. 青藏高原第四纪冰川遗迹分布图. 北京: 科学出版社, 1991
 Li Bingyuan, Li Jijun. *Quaternary Glacial Distribution Map of Qinghai-Tibetan Plateau*. Beijing: Science Press, 1991
- 76 李炳元. 中国第四纪冰川图(1:500万). 见: 施雅风主编. 中国第四纪冰川与环境变化. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2006
 Li Bingyuan. Quaternary glacial distribution map of China (1:5000,000). In: Shi Yafeng ed. *The Quaternary Glaciations and Environmental Variations in China*. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Publishing, 2006
- 77 张威, 翁玲, 崔之久等. 长白山现代理论雪线和古雪线高度. 第四纪研究, 2008, 28(4): 739~745
 Zhang Wei, Yan Ling, Cui Zhijiu et al. Present and Late Pleistocene equilibrium line altitudes in Changbai Shan, Northeast China. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 739~745
- 78 易朝路, 刘克兴, 崔之久. 天山乌鲁木齐河源冰砾AMS测年及其意义. 科学通报, 1998, 4(20): 1749~1751
 Yi Chaolu, Liu Kexing, Cui Zhijiu. AMS dating on glacial tills in the source area of the Armqi River in the Tianshan Mountain and its implications. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 4(20): 1749~1751
- 79 周尚哲, 李吉均. 第四纪冰川测年研究新进展. 冰川冻土, 2003, 25(6): 660~666
 Zhou Shangzhe, Li Jijun. New dating results of Quaternary glaciations in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 660~666
- 80 郑本兴. 云南玉龙雪山第四纪冰期与冰川演化模式. 冰川冻土, 2000, 22(1): 53~61
 Zheng Benxing. Quaternary glaciation and glacier evolution in the Yulong Mount, Yunan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1): 53~61
- 81 Owen L A, Kamp U, Spencer J Q et al. Timing and style of Late Quaternary glaciation in the eastern Hindu Kush, Chitral, Northern Pakistan: A review and revision of the glacial chronology based on new optically stimulated luminescence dating. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 41~45
- 82 李四光. 中国第四纪冰川. 北京: 科学出版社, 1975. 1~160
 Li Siguang. *Quaternary Glaciers in China*. Beijing: Science Press, 1975. 1~160
- 83 Tooth S, McCarthy T S. Wetlands in drylands: Geomorphological and sedimentological characteristics, with emphasis on examples from Southern Africa. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31(1): 3~42
- 84 Yang Xiaoping. Late Quaternary wetter epochs in the southeastern Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2004, Suppl. (133): 129~141
- 85 Yang Xiaoping. Changes of the aridity index in the arid regions of north Western China since the Late Pleistocene—An understanding based on climatic geomorphology. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2002, Suppl. (126): 169~181
- 86 董治宝. 中国风沙物理研究五十年(I). 中国沙漠, 2005, 25(3): 293~305

- Dong Zhibao. Research achievements in aeolian physics in China for the last five decades(I). *Journal of Desert Research*, 2005, 25(3): 293~305
- 87 吴正. 风沙地貌研究论文选集. 北京: 海洋出版社, 2004. 1~225
- Wu Zheng. Selected Papers about Aeolian Geomorphology. Beijing: China Ocean Press, 2004. 1~225
- 88 朱震达. 中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理的对策. 北京: 中国环境科学出版社, 1999. 1~416
- Zhu Zhenda. Deserts, Desertification, Land Degradation and Strategies for Their Rehabilitations in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1999. 1~416
- 89 王涛. 我国沙漠与沙漠化科学发展的战略思考. 中国沙漠, 2008, 28(1): 1~7
- Wang Tao. Strategic consideration on desert and desertification sciences development in China. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1): 1~7
- 90 Schwaemmle V, Herrmann H. Solitary wave behaviour of sand dunes. *Nature*, 2003, 426: 619
- 91 Elbelrhiti H, Claudin P, Andreotti B. Field evidence for surface-wave-induced instability of sand dunes. *Nature*, 2005, 437: 720~723
- 92 Yang Xiaoping. Chemistry and Late Quaternary evolution of ground and surface waters in the area of Yabulai Mountains, Western Inner Mongolia, China. *Catena*, 2006, 66(1~2): 135~144
- 93 Yan S, Mu G, Xiu Y et al. Environmental evolution of the Lop Nur Region in Tarim Basin since early Pleistocene. *The Quaternary Research*, 1997, 36(4): 235~248
- 94 王富葆, 马春梅, 夏训诚等. 罗布泊地区自然环境演变及其对全球变化的响应. 第四纪研究, 2008, 28(1): 150~153
- Wang Fubao, Ma Chunmei, Xia Xuncheng et al. Environmental evolution in Lop Nur since Late Pleistocene and its response to the global changes. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(1): 150~153
- 95 罗超, 刘卫国, 彭子成等. 新疆罗北洼地湖相沉积物有机碳同位素的变化序列及其古环境意义. 第四纪研究, 2008, 28(4): 621~628
- Luo Chao, Liu Weiguo, Peng Zicheng et al. Stable carbon isotope record of organic matter from the Lop-Nur Lacustrine sediment in Xinjiang, Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 621~628
- 96 薛积彬, 钟巍. 新疆巴里坤湖全新世环境记录及区域对比研究. 第四纪研究, 2008, 28(4): 610~620
- Xue Jibin, Zhong Wei. Holocene climate change recorded by lacustrine sediments in Barkol Lake and its regional comparison. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 610~620

SOME ASPECTS ABOUT CHINESE GEOMORPHOLOGY: RECENT PROGRESSES FROM AN EARTH SYSTEM SCIENCE PERSPECTIVE

Yang Xiaoping^① Shi Changxing^② Li Bingyuan^② Zhu Bingqi^①

(^①Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

^②Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

From the perspective of interactions between various layers in the Earth System, the paper aims to review recent progresses in the fields of studies on desert geomorphology in China, fluvial processes, glacial processes as well as aeolian processes. Due to the special geographical location, the formation and evolution of Chinese deserts are closely linked with the uplifting of the Tibetan Plateau. Consequently, the research on formation and evolution of Chinese deserts would reveal significant evidence for understanding the uplifting of the Tibetan Plateau. In the last 30 years, the initial ages relating to the formation of the Chinese deserts have been updated several times. The newly studied records show that Chinese deserts have been formed already at Miocene. But the rapid extension of the dune fields in China started probably during the Middle Pleistocene. It is concluded that distinct climatic and geomorphological variations have occurred in the desert areas of China since Late Pleistocene. As the main sources of dust and sand storms, the deserts would have impacts on the forces triggering global changes. It should be emphasized that desert landforms of China undergo not only aeolian processes but also fluvial and lacustrine processes. Landforms are the final products of all dynamic processes. Glacial landforms are the firstly recognized evidence for interpreting Quaternary climate changes. As the dating techniques are being improved, scientists have now obtained a systematic and comprehensive picture about Quaternary glacial history in China. As a kind of geomorphological process, fluvial processes occur most widely on Earth. Studies on fluvial processes are being carried out nowadays in detail on various scales.

Key words desert, geomorphological process, global change, geomorphology, Earth System Science