

试论大地热流对地表环境与生态演变的影响

匡耀求 黄宁生 朱照宇 胡振宇

(中国科学院广州地球化学研究所,广东 广州 510640)

提要:从地表自然生态系统发育与环境演变的一些难解之谜追索到地球内部能量的影响,对比世界各地主要地理单元的大地热流特征与生态环境特征发现,各地生态环境的优劣与区域大地热流的高低有密切的关系。典型森林生态系统的大地热流比较高,而典型荒漠生态系统的大地热流均比较低。大地热流不仅可能影响区域气候的干湿程度,而且还可能决定一个地区地表生态系统能量供给的下限,是区域生态系统发育与演变过程中一个重要的物种限制因子。大地热流低可能是导致一些盆地生态体系发育不良,进而演变成为沙漠的重要原因。研究大地热流对生态环境退化的影响和机理、了解区域生态体系和现代环境格局形成背景,以及区分环境和生态演化中自然和人文因素的作用具有重要意义,同时将为区域环境和生态建设以及管理决策提供科学依据。

关键词:大地热流;生态环境;限制因子;气候演变;荒漠化

中图分类号:P314.2 文献标识码:A 文章编号:1000-3657(2002)01-0086-010

一些地质学家为了探索地球内部的结构和寻找地热资源,了解地球内部能量分布状况,在地表附近通过钻孔观测了来自地球内部的热流情况。通常把单位时间内由地球内部以传导方式通过单位地球表面散失的热量称之为大地热流(Terrestrial Heat Flow)。热流值等于热导率与温度梯度的乘积。自1939年Bullard首次给出大地热流测量结果后,这一参数得到了越来越多的地质工作者的关注,至1990年全世界已取得24 639个热流数据^[1],目前以每年新增约500个数据的速率增长^[2]。中国的大地热流研究始于20世纪70年代,据不完全统计,截止1999年,已累计获得了822个陆地大地热流测量数据^[3]。全世界已有的大地热流研究结果表明,火山活动区、地震活动带、现代裂谷区、活动大陆边缘和年轻造山带等地壳构造单元的大地热流比较高,而比较稳定的古老地盾区、地台区以及克拉通化地区等构造单元的大地热流比较低。目前大地热流研究已被广泛应用于大地构造学研究、岩石圈结构与动力学研究、地热资源勘查、盆地油气资源评价以及全球变化中的古气温和古气候恢复研究等工作中^[4-11]。同时,大地热流数据也已成为建立岩石圈结构、成分以及各种地球

物理和地球化学模型的重要约束参数^[12]。然而,大地热流作为来自地球内部的能量在地球圈层耦合过程中的作用和对地表生态环境的影响尚未引起人们的注意。本文试图作一探讨,以引起人们的重视。

1 地表自然生态发育与环境演变的一些难解之谜

生态系统是指一定空间中的生物群落与其环境组成的系统,其中各成员借助能量和物质循环形成一个有组织的功能复合体。陆地自然生态系统一般划分为森林生态系统、草原生态系统、荒漠生态系统(如沙漠生态系统和冻原生态系统)等。森林生态系统无论空间结构还是营养结构都比较复杂,系统的自我修复能力比较强,因而表现出比较稳健的特性,对外界扰动的承受能力比较强;而荒漠生态系统无论空间结构还是营养结构都比较简单,系统的自我修复能力比较差,因而表现出比较脆弱的特性,对外界扰动的承受能力比较弱。从森林生态系统到草原生态系统,再到荒漠生态系统,系统的脆弱程度增加,对外界扰动的承受能力减弱。

一般认为,地球生态系统的能量来自太阳辐射。

太阳能是一切生命活动的初始能源,它通过光合作用得以在植物中储存,以化学键的形式在食物链中传递,并在逐级分解过程中释放出来,最后以热的形式散失。由于太阳辐射在地球表面分布的差异表现出纬度地带性和高度地带性(也叫垂直地带性),地表生态系统亦呈现出明显的地域分异。地表从赤道往两极、从低海拔到高海拔按接受太阳辐射热量的多少可以依次划分为热带、温带和寒带,但地表生态系统的地域分异并非完全与太阳辐射的地带性相对应,无论是热带、温带还是寒带,地表生态系统的发育程度均是因地而异。同一纬度、同一高程的地带上往往发育有明显不同的生态系统。比如,北回归线所经之地,绝大多数是沙漠,有北回归线干旱地带之称。但是,在这个带上的中国广东、广西和云南,却是一片连绵不断的绿洲,发育有得天独厚、苍翠欲滴的天然绿色林带。尤其是西双版纳的热带雨林,更是令人称奇!为什么在相似的地理条件下会形成如此天壤之别的生态景观?

事实上,这种在相似地理条件下出现截然不同生态景观的现象在很多地区都存在,只是在南北回归线及其两侧(约在南北纬 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之间)的回归带上表现得特别明显,该带上既有荒无人烟的沙漠和物种简单的草原,也有生物多样性十分丰富的绿色林带。北回归线经过的北半球16个国家和地区中,沙漠发育的有12个。如非洲北部的撒哈拉(Sahara)大沙漠、阿拉伯半岛上的鲁卜哈利(Arrabal Khali)沙漠、内夫得(An Nafud)沙漠、印度河下游的塔尔(Thar)沙漠、中美洲墨西哥西北部的奇瓦瓦(Chihuahua)沙漠等。南回归线经过的10个国家和地区也有6个国家的很大一部分地区被沙漠覆盖。如南美洲智利的阿塔卡马(Atacama)沙漠,澳大利亚的大沙(Great Sandy)沙漠和维多利亚(Great Victoria)沙漠,南非的纳米布(Namib)沙漠和卡拉哈里(Karahali)沙漠等。在回归带上也有一部分地区,干湿季节明显,由于每年出现干旱季节,不利于高大乔木生长,因而形成了“一岁一枯荣”的草原。如亚洲的印度半岛、美洲的巴西高原、墨西哥高原中南部、非洲南部、马达加斯加西部地区,都分布着大片的热带草原:在旱季,草类枯萎,稀树落叶,呈现一片荒凉景色;而在雨季,则呈现出绿草如茵、万紫千红的一派生机勃勃的景象。另外,在地处某些大陆东岸的部分回归带地区,气候湿润,雨水充足,热量丰富,

植被茂盛,农业发达。这些地区包括:美国东南部、印度的恒河流域及中南半岛、中国南部、巴西南部、南非东部、莫桑比克南部、马达加斯加岛东部、澳大利亚东部。

造成回归带上的国家和地区自然生态环境出现巨大反差的原因,一般归因于其所处的海陆位置(如东岸、西岸或内陆)、大气环流、风系(风带)等地理因素的作用,认为一些大陆的东岸地区之所以生态环境较好是因为其气候湿润、雨水较多,而西岸由于信风吹刮,少云寡雨,气候干旱,形成所谓信风沙漠带。但是,这些因素无法解释为什么该带上地处阿拉伯海之滨的阿拉伯半岛东南部(鲁卜哈利沙漠从沙特东南部往东穿过阿拉伯联合酋长国、往南穿过阿曼延伸到了阿拉伯海之滨)以及非洲大陆东岸的埃及东南部(埃及东部沙漠)和苏丹东北部(努比亚沙漠)的红海之滨,虽然信风的影响难以波及,却也摆脱不了沙漠的荒凉,而在阿拉伯半岛的西面沿红海之滨却为沙特阿拉伯孕育了一串绿色明珠?为什么在沿着东非裂谷西支纵贯非洲东部内陆的狭长地带,却发育了一条绿色长廊,孕育出了尼罗河流域的人类文明?为什么分别位于大西洋东西两侧的非西岸刚果盆地和南美大陆东岸亚马逊平原均发育了世界上生物多样性最好的热带雨林?为什么巴西东部大西洋沿岸的滨海地区也演变成了热带稀树草原和荒漠?为什么南美洲南段阿根廷的东部南大西洋之滨的巴塔哥尼亚地台也演变成了荒漠?是什么因素在起作用?

1.1 同一纬度不同地区气温年较差存在显著差异

如果地表的热量完全来自太阳辐射,那么地表的温度就由太阳辐射的强度和温室效应的强弱所决定,地表气温应该随纬度和高程变化,即纬度越低,接受的太阳辐射越强,平均气温越高;同时,由于地球大气越往高空越稀薄,温室效应随海拔高程升高而减弱,海拔高程越低,温室效应越强,则地表平均气温越高,年均温差越小。比如,在强烈的温室效应作用下,金星表面保持了约 470°C 的恒温状态,而温室效应较弱的水星表明温度变化于 $-173^{\circ}\text{C}\sim 427^{\circ}\text{C}$ 之间,温差达 600°C 。通常,温室效应减弱会使温室的温度随环境温度变化的程度增大。因此,从低纬度到高纬度和从低海拔到高海拔地表气温的年较差会逐渐增大,如平均气温年较差在北纬 25° 左右的珠江流域约为 16°C ,在北纬 30° 左右的长江中下游为 $24\sim$

26℃,在北纬35°左右的华北地区达32℃,在北纬50°左右的黑龙江漠河达44℃。但为什么地处云南高原,海拔1800多米的昆明,其气温年较差只有10~12℃,而同一纬度,海拔只有不到200 m的桂林,气温年较差却超过20℃呢?

1.2 太阳辐射程度相同的地区地表平均气温有很大的差别

地球和月亮与太阳的距离相差无几,同样天天都在围绕着太阳转,同等面积的月亮表面和地球表面接受的阳光辐射应该是相同的,但地表的平均温度是15℃,而月表的平均温度却是-18℃^[21],二者相差33℃。导致这种温差的原因除了地球有一层大气环绕会产生温室效应之外还有没有其他原因呢?地球内部散发的热量对维持地表较高的温度有没有贡献呢?

如果说月亮与地球表面温度的差异还可以用温室效应的差异来解释的话,那么地球南北两极接受的太阳辐射都很少,同样处在地球大气层的笼罩之下,其接受的太阳辐射强度和温室效应的强弱应该没有太大的差别,但南极(绝大部分为前寒武结晶基岩构成的地盾,大地热流低)地表的年均气温为-50℃,而北极(为大洋,大地热流较高)地表的年均气温却是-18℃。两极年均气温居然相差32℃,为什么?

1.3 同一纬度带不同地区生态系统脆弱程度不同

在中国北部北纬35~45°地带,由西往东依次有塔里木盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地、华北盆地和松辽盆地。各盆地的生态环境则是由东往西逐渐变劣。西部的新疆塔里木盆地发育了世界上最大的流动沙漠——塔克拉玛干大沙漠,被称之为死亡之海。一些人认为它是人类活动破坏生态环境造成的。然而,在古代,人类活动的破坏能力是非常有限的,历史上中国西部的人类活动强度无疑大大低于中部和东部,为什么西部的塔里木盆地变成了世界上最大的流动沙漠,而中部和东部的盆地反而没有呢?显然,西部的自然生态比较脆弱。

巴西内陆亚马逊盆地南部与巴西东部沿岸滨海地盾的北部处于同一纬度带,为什么巴西内陆的亚马逊盆地发育了生物多样性最为丰富的热带雨林生态系统,而地处大西洋之滨的巴西东部沿岸滨海地盾的北部(巴西利亚褶皱带)却演变成了热带荒漠和热带稀树草原?

为什么地处北纬50~60°之间大西洋东岸的爱尔兰、英国、德国、荷兰和比利时等高度发达的资本主义国家生态环境优越,而同一纬度的大西洋西岸加拿大拉布拉多半岛(Labrador Peninsular)的自然条件却十分恶劣呢?

研究这些问题对了解一个地区生态环境退化的影响机理十分重要,也是区分环境和生态演化过程中自然与人文因素作用的基础,是区域开发迫切需要回答的科学问题,对认识一个地区现代环境格局的形成以及预测区域环境和今后生态的发展趋势有重要意义。

2 典型自然生态系统发育区的大地热流特征

对比世界各地主要地理单元的大地热流特征与生态环境特征,笔者发现,各地生态环境的优劣与区域大地热流的高低有密切的关系。通常,大地热流较高的地区生态体系发育较好,生态环境优越;而大地热流较低的地区生态环境比较恶劣。比如典型的荒漠地带大多是低热流地带,大地热流值一般低于50 mW/m²(表1);而高热流地带的生态环境一般比较优越,如亚马逊河流域的热带雨林地区,东南亚的热带森林地区也都是高热流地带。即使在一些寒冷的高原地区,高热流地带自然生态体系也发育较好,如青藏高原南部雅鲁藏布江流域的藏南谷地(藏东南林芝地区,年降雨量达900~2300 mm,森林覆盖率达34.5%,尤其是雅鲁藏布江大拐弯地区的墨脱附近还发育有世界上纬度最高的热带森林)欧洲阿尔卑斯山脉和北美洲落基山脉的许多地区等。东非裂谷地带是典型的高热流区^[13],该裂谷带上的尼罗河流域就发育了良好的生态体系,孕育了纵贯非洲大陆,穿越撒哈拉大沙漠东部的尼罗河文明。生态环境比较优越的一些大陆的东岸地区也是大地热流高值带;而生态环境比较恶劣的阿拉伯半岛的东南沿海地区正好是大地热流低值带。世界上一些典型的高生产力地区,如德国沿莱茵地堑(Rhine Graben)发育的莱茵河流域、法国中央地块沿布勒斯特地堑(Bresse Graben)和罗纳坳陷带(Rhone Depression)发育的罗纳河流域以及沿利马纳地堑(Limagne Graben)发育的卢瓦尔河流域、俄罗斯沿贝加尔裂谷(Baikal Rift)发育的贝加尔湖地区、美国科罗拉多高原与大平原之间沿里奥格兰德

表 1 典型自然生态系统的大地热流特征

Table 1 Features of the terrestrial heat flow of some typical natural ecosystems

生态系统	典型地区	大地热流(单位: mW/m^2)			
		平均值	变化范围	测点数	数据来源
荒漠生态系统	塔克拉玛干大沙漠	44	31 ~ 72	76	文献 [13]
	印度塔尔沙漠		26 ~ 40	7	文献 [13]
	非洲尼日尔沙漠		18 ~ 22	3	文献 [13]
	西澳大利亚沙漠		29 ~ 54	3	文献 [13]
	巴西滨海地盾荒漠和稀树草原		26 ~ 69	4	文献 [13]
草原生态系统	鄂尔多斯草原	55	35 ~ 72	4	文献 [13]
	呼伦贝尔草原	61	54 ~ 71	18	文献 [13]
	印度德干高原草原	54			文献 [13]
森林生态系统	亚马逊热带雨林		53 ~ 99	4	文献 [13]
	西双版纳热带季雨林	71	55 ~ 99	7	文献 [13]
典型高生产力生态系统	德国莱茵裂谷带	112.2	69.1 ~ 139	8	文献 [14]
	法国中央地块裂谷带		100 ~ 110		文献 [14]
	美国里奥格兰德裂谷带	108.4	82.1 ~ 152.4	10	文献 [15]
	俄罗斯贝加尔裂谷带	96.7	45 ~ 141.9	52	文献 [16]

裂谷(Rio Grande Rift)发育的格兰德河流域都是大地热流特别高的地带(表1)。

中国大地热流的分布具有“东高西低、南高北低”的特点(图1),西南最高($81 \pm 51 \text{ mW}/\text{m}^2$),东南次之($70 \pm 19 \text{ mW}/\text{m}^2$),东北较低($61 \pm 17 \text{ mW}/\text{m}^2$),西北最低($43 \pm 9 \text{ mW}/\text{m}^2$);中部地区的热流平均值为 $63 \pm 12 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。而中国的自然生态环境东部优于西部、南方优于北方,西南优于西北、中部地区居中的发育格局与大地热流高低变化格局的这种高度一致性,相信也不会是偶然的巧合。

对比中国内陆北方几大盆地的热流特征(图1)和生态体系发育程度,我们发现,盆地内生态体系发育的好坏,生态体系的生物生产力与盆地内的大地热流高低有密切关系,高热流区自然生态体系发育好,生物生产力高,而低热流区自然生态体系发育差,生物生产力低(表2)。而且同一盆地内不同地区之间由于区域大地热流的差别,其生态环境的差异也十分明显。比如,在塔里木盆地西北部的大地热流($45 \sim 50 \text{ mW}/\text{m}^2$)比西南部($30 \sim 40 \text{ mW}/\text{m}^2$)高^[23],其生态环境也是西北部优于西南部。

地带性植被——亚热带常绿阔叶林一般出现在北回归线以南,从中国植被图上可以看到,在云南西部和粤东及闽南地区亚热带常绿阔叶林的分布却出现了明显的北移。而这两个地区也正好是大地热流高值地带。在北美洲,沿落基山脉的高热流带使加拿大的森林植被发育从北纬 50° 在加拿大的东部和中

部地区,北纬 50° 以北基本上是冰原景观和苔原景观,北延到了北纬 65° 的北极圈。滨太平洋阿拉斯加造山带的高热流使得靠近北极圈的阿拉斯加育空河(Yukon)流域(位于北纬 65° 左右)居然发育了良好的森林生态系统,而在北美大陆东岸地处加拿大地盾(大地热流为 $27 \sim 51 \text{ mW}/\text{m}^2$ ^[13])的拉布拉多半岛虽然纬度要低 $5 \sim 10^\circ$ (处于北纬 $55 \sim 60^\circ$ 左右),却是一片荒凉世界,来自大西洋的暖流对该区的生态系统爱莫能助。

由海底玄武岩喷发而成的冰岛(面积 10.3 万 km^2)现有30座活火山,虽地处北极圈附近,但只有约13%的土地(在北冰洋沿岸和内陆高地)常年冰雪覆盖,而南、东、西三面冬暖夏凉,1月平均气温 1°C ,7月的平均气温 11°C ,气候温和,属温带海洋性气候,岛内发育有良好的生态体系,而且岛内居民所用能源全部取自地热。人们通常认为是大西洋的暖流维持了该区生态体系的发育,可是该岛沿海地区大多为苔原景观,岛内最大的冰川(Vatnajökull)位于东南部,直接面对大西洋,而植被景观却主要出现在岛内火山作用和温泉发育的地区,很多地方可以见到植被沿着温泉发育而成的绿色环状植被景象。因此,冰岛地区生态体系的发育可能与其大地热流的关系更为密切。

与冰岛地处同一纬度带的格陵兰岛南部,却是一片冰天雪地,全岛84%的土地被冰层覆盖。大西洋的暖流仅使其西南岸和南端沿岸很少的地区可以住

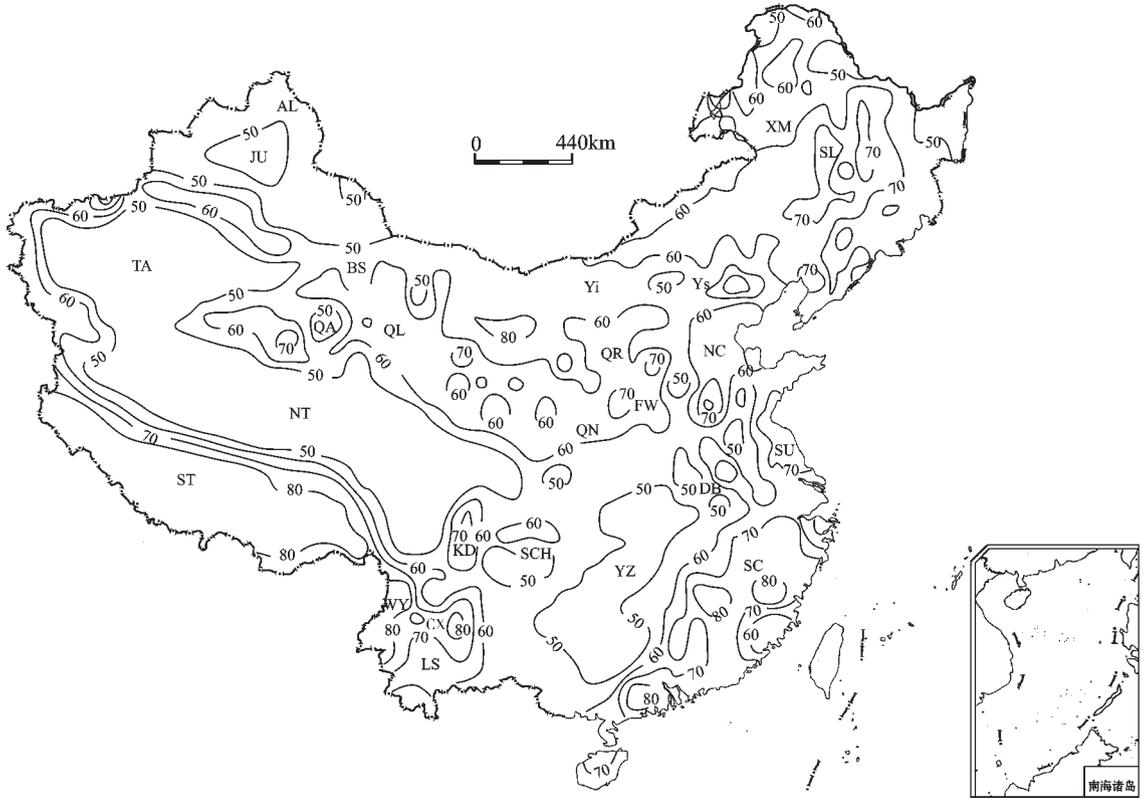


图1 中国大陆大地热流图^[3] (mw/m²)

Fig. 1 Isomap showing the terrestrial heat flow of the continent of China

AL—阿尔泰 ;BS—北山 ;CX—楚雄盆地 ;DB—大别山 ;FW—汾渭地堑 ;JU—准噶尔盆地 ;KD—康滇构造带 ;
 LS—兰坪—思茅盆地 ;NC—华北盆地 ;NT—藏北 ;QR—鄂尔多斯盆地 ;QA—柴达木盆地 ;QL—祁连山 ;
 QN—秦岭 ;SC—华南造山带 ;SCH—四川盆地 ;SL—松辽盆地 ;ST—藏南 ;SU—苏北盆地 ;
 TA—塔里木盆地 ;WY—滇西 ;XM—兴蒙 ;Yi—阴山 ;Ys—燕山 ;YZ—扬子江地台中部

表2 中国北方大陆地区沉积盆地大地热流与生态特征

Table 2 Terrestrial heat flow and ecological features of sedimentary basins in the continental region of northern China

沉积盆地	塔里木盆地	准噶尔盆地	柴达木盆地	鄂尔多斯盆地	华北盆地	辽河盆地
大地热流 (mW/m ²) ^[18-24]	44(24)	42.3(35)	52.6(21)	58(14)	63(122)	63(45)
主要生态类型	沙漠和戈壁	沙漠	沙漠、盐沼和草原	沙漠和草原	草原、森林和农田	森林和农田
生态环境优劣	极差	极差	差	一般	良	优
生物生产力	很低	很低	低	一般	较高	高

注：表中热流值后括号内的数值为统计测点数。

人(尽管其无冰带的面积是冰岛的3倍多,但人口只有冰岛的1/5多一点),1月平均气温低至-5℃,7月的平均气温也只有7~10℃,属海洋性苔原气候。原因是格陵兰岛的构造基础是北美大陆加拿大地盾的延伸,是一稳定地块,大地热流值很低。

显然,地表自然生态系统的发育以及生态系统的稳健性与大地热流值的高低有密切的关系。

3 大地热流对区域气候演变的影响

地表接受的太阳辐射强度与纬度和高程有密切的关系;但各地气候的干湿程度却和纬度及高程没有明显的关系,而与其大地热流的高低却有较好的对应关系(表3)。

大地热流很低的地区,区域大气层的温度及大

表 3 不同湿度地带的大地热流特征
Table 3 Features of the terrestrial heat flow of zones with different humidities

按干湿程度划分的地带	自然地理景观	大地热流(mW/m^2)
干旱地带	沙漠、戈壁、荒漠	< 40
半干旱地带	草原、沙地	40 ~ 50
半湿润地带	稀树草原	50 ~ 60
湿润地带	森林	> 60

气温度的分层完全由太阳辐射所决定。由于不同高度的大气层接受的太阳辐射热量不同,不同高度的大气层温度有明显的不同,通常是上层气温较高,而下层气温较低,大气分层较明显,大气的运动主要表现为水平运动,因而不利于形成降水。大地热流比较高的地区,区域大气层的温度,虽然在白天,特别在夏季的白天也主要由太阳辐射所决定,但到了夜晚,特别是冬季的夜晚,则大地热流可以起到一定的作用:由于来自地下的热流可以加热靠近地表的底层大气(特别是在没有太阳辐射的夜晚和太阳辐射微弱的冬季),驱动较热的气流上升,而较冷的气流下降,使得区域大气的垂直对流运动增强,有利于形成降水。世界上年平均降水量最多的地方是位于太平洋中北部夏威夷群岛最北端的可爱岛(Kauai Island,通常译为考爱岛,为该群岛的第二大岛)欢迎您来山(Mt. Waialeale,也有人译为怀厄莱阿莱山、威尔里尔山,最高峰海拔1569 m)的迎风坡,年平均降水量达11684 mm。而夏威夷群岛恰恰是地球上最大的热点,大地热流很高,而可爱岛是来自太平洋北方的冷气流南移时遭遇的第一股上升暖气流,因此降水集中到了可爱岛的欢迎您来山。中国年降水量的最高纪录在台湾的火烧寮,1912年降水量达到8409 mm,这里也是中国大地热流最高地区之一。从福州到南昌,南北从粤闽边境到皖赣边境的一大片山地(地质构造上称为华南褶皱带),年均降水量均在1600 mm以上,明显高于周边地区,巧合的是该范围的大地热流也明显高于周边地区,绝大部分测点的大地热流值在 $70 \text{ mW}/\text{m}^2$ 以上,福州附近的两个测点的大地热流值分别达 $104.4 \text{ mW}/\text{m}^2$ 和 $207 \text{ mW}/\text{m}^2$ ^[25],而该区域的年均降水量更高达2000 mm以上。从中国西藏的墨脱到印度的乞拉朋齐再到孟加拉国首都达卡沿着布拉马普特拉河流域的一个北东向的地带是一个高热流地带,可能是一个正在孕育的裂谷,这里也是全世界降雨量最为丰富的地区,年均降水量

高达5000 mm,其中位于印度东北部卡西丘陵南坡一袋形山坳的小镇乞拉朋齐(Cherrapunji),海拔1313 m,年均降水量11430 mm,1861年曾有年降水22990 mm的世界纪录,1961年的降水量更高达26461 mm。该区域丰富的降水使地处下游的孟加拉国经常洪水泛滥而成为泽国。在1707万 km^2 的俄罗斯大地上,年均降水量超过1000 mm的只有西南部与格鲁吉亚交界的高加索山脉一带以及东部的太平洋沿岸两个狭长地带,这也是俄罗斯境内大地热流最高的两个地带。加斯加德山脉(Cascade)西部山区是美国西部降水最多的地区,年均降水量超过3000 mm,美国最高的活火山——雷尼尔火山以及著名的圣海伦斯火山均位于该地区,也是一个高热流地带。大地热流对大气降水的影响显而易见。

大地热流的高低与江河、湖泊的发育可能也有一定的关系,一些比较大的河流,如尼罗河、莱茵河以及美国与墨西哥边境的格兰德河,分别沿着东非裂谷(西支)、莱茵裂谷和里奥格兰德裂谷发育,这些裂谷是典型的大地热流高值地带。有些河流沿着两个不同地体的结合带发育,如长江干流、汉水等,这些结合带通常也是地壳的薄弱地带,其大地热流也比较高。一些小的河谷通常沿断裂带或地壳脆弱带发育,而断裂带或地壳脆弱带通常也是大地热流相对较高的地带。

世界的主要淡水资源赋存在裂谷湖泊中,如贝加尔裂谷上的贝加尔湖,东非裂谷上的马拉维湖、坦葛尼喀湖、基伍湖、阿明湖和蒙博托湖等。这些地区的大地热流均比较高。此外,大地热流较高的这些地区由于水分较多,植被较发育,地面较湿润,可以吸收并储存较多的太阳能,进一步增强这些地区大气的垂直对流,从而形成有利于降水的良性循环。

显然,世界气候干湿地带的分布与大地热流高低的对应关系绝不是偶然的巧合,大地热流可能在一定程度上影响了区域气候的演变。

4 大地热流对生态系统发育与演变的影响

温度是影响生物生长发育最重要的因素之一,所有生物都是在一定的温度条件下生长、发育、繁殖和活动。其温度范围大致在 $0\sim 50^\circ\text{C}$,少数种类能够在更高一些或更低一些的温度内生活。例如,有一种蓝藻可在 85°C 的热水中生活,而雪衣藻则生长在雪地

上。植物和变温动物的体温随外界环境的变化而变化,受外界温度的影响较为显著。生物生长发育最快速时的温度称为最适温度。生物可以进行正常生命活动的温度范围称为适温。每种生物都有自己的适温范围。超越适温范围的条件下,生物停止生长发育,进入休眠状态,甚至造成昏迷或死亡。适温范围的上限称为临界高温,下限称为临界低温。

在较短时间内造成生物死亡的温度称为致死高温或致死低温。在适温范围内,温度的昼夜变化和季节变化有利于生物多样性的形成,但温度变化幅度超出适温范围时,将对生物产生危害。超出临界高、低温和致死高、低温,则会抑制生物种群的数量,甚至使整个种群毁灭。漫长的冬季低温可使越冬昆虫大量死亡,降低虫口。低温还使光合作用速度降低,减少干物质的积累。因此,温度会影响植物群落的净生产能力。

各种生物只分布在它们所能耐受的温度范围内,显然,温度或热能是生态系统存在和演化的限制因子。在地表的绝大部分地区,由于太阳辐射的通常比大地热流要高得多,因此,地表生态系统的温度上限主要由太阳辐射的强度和温室效应的强弱所决定;但在冬季,太阳辐射强度大大减弱,尤其在夜晚,几乎没有太阳辐射,这时生态系统的温度主要由大地热流的强度所决定,即生态系统的温度下限通常是由大地热流所控制的。无疑,大地热流是这些地区生态系统发育与演化的一个重要限制因子。

如果把地表生态系统接受的总热量称之为地表热流,那么地表热流不均就应该是导致地表生态环境变化的重要因素之一。而地表热流有两个主要来源,一个来自地外辐射(主要是太阳能),另一个则是地球内部散发出的热量(即大地热流)。地外辐射对地表热流的贡献主要由地理位置和地形地貌特征决定,在相同的纬度和相似的地形地貌条件下,区际变化不大,但同一地区接受的地外辐射能量,昼夜反差很大,而且存在明显的季节变化;而地球内部散发出的热量对地表热流的贡献则与区域岩石圈结构以及岩石圈内各圈层的地球化学特性有关,区际变化可以较大,但同一地质单元的大地热流不存在昼夜差别,季节变化也不明显。大地热流比较低的地区,其生态体系主要依靠地外辐射的能量驱动,必须承受昼夜之间能量供给差异造成的大幅波动,同时还要忍受不同季节的显著变化,其生

物的多样性受到限制,区域生态系统必然变得比较脆弱,对人类活动影响的承受能力非常有限。而大地热流比较高的地区,大地热流也成为驱动区域生态体系发育演化的重要能源,这种能源供给的波动幅度要小得多,使得地表热流具有较高的背景值,对生物发育的限制也要少得多,生物多样性发育得比较好,区域生态系统会比较稳健,对人类活动的影响有较大的承受能力。

大地热流提供给地表生态系统的能量虽然相对于太阳能来说,其数量可能要少得多,但却要温和得多,而且没有季节和昼夜的变化,它为地表的生态体系在缺乏太阳温暖的时候提供了使生态体系得以延续的必要能源。这种能量可能更加适合生态系统的发育和维持区域生态系统的稳定。

5 若干认识和结论

地球表面的生态系统在演变,这种演变受到很多因素的影响,既有自然因素,也有人为因素,有些因素我们已经认识到了,有些还没有认识到,有些因素是主要的,有些因素是次要的。不同的地区由于主导自然因素(限制因子)的显著差异而形成了不同的自然生态系统:从自我调节能力很强的稳健生态系统(如热带雨林生态系统)到一受到干预就可能崩溃的脆弱生态系统(如沙漠生态系统和冰原生态系统)。地球上绝大多数地区的生态系统一般处在这两者之间,如温带草原生态系统,亚热带季雨林生态系统等,但是由于自然的原因或者人类干预的影响等原因,这些影响因素也在不断地和程度不同地发生改变,驱使生态系统也发生相应的调整 and 变化,生态系统通常会由于其主导影响因素的变化而发生演变,这种演变要么朝好的方面演变,如提高生态系统的稳健性,朝热带雨林生态系统演变;要么朝坏的方面演变,如降低生态系统的稳健性,朝荒漠生态系统演变,如沙漠化、石漠化。这样就会导致生态系统出现分岔。生态系统出现分岔就表明某个影响因素(限制因子)的变化达到了临界状态。要维护好生态系统,提高生态系统的稳健性,防止生态系统的崩溃,我们必须知道影响生态系统演变的主导因素(或关键因素)有哪些,哪些因素是表面上的因素(纬度,高程等),哪些因素是本质上的因素(太阳辐射强度、大地热流高低、土壤特性、水份等),这些因素导致生态系统出现分岔的阈值(临界值)是多少。只有这样,我

们才能控制人类活动的强度和程度,并使人类对生态系统的干预朝着有利于保持和提高生态系统稳健性的方向进行。这将是一个值得深入研究的方向。

我们天天在谈论生态保护,但天天都有人在“破坏”生态。当然这里所指的这种对生态的破坏并非那种有意的破坏。我们天天有人在治理荒山,防护林一期接一期地建,但荒漠化趋势却日趋严重,塔克拉玛干、古尔班通古特、库布其等八大沙漠,浑善达克、科尔沁、毛乌素、呼伦贝尔四大沙地都在日趋扩大,丝毫未见缩小的迹象。近年来各大传媒广为引用的一组数据是:目前中国荒漠化面积已达262.2万 km^2 ,占国土面积的27.3%,每年还在新增2460 km^2 。即使根据比较保守的估计,到上世纪90年代,我国的沙漠面积也已达80.89万 km^2 ,并且还在以310 km^2/a 的速度扩大^[26]。

长期以来,我们对生态系统的了解局限于生物学领域和地理学领域,也就是说我们在考虑生态系统的影响因素的时候,仅考虑了地面以上的因素,总认为地面以下是“铁板”一块。其实生态系统与地面以下也是存在物质和能量交换的。地面以下的因素对地表生态系统的影响是非常明显的,如近年来兴起的土壤地质学与农业地质学就表明很多农业土特产的产出就与地面以下的因素(如基岩的化学成分、地层的结构、水文特性等)有密切关系。来自地下深处的热能——大地热流也是驱动生态系统发育和演化的重要因素之一。因此,对生态区的评价也必须考虑地面以下的因素。比如,很多人都知道,鄂尔多斯盆地的北部(即地理学上称为鄂尔多斯高原)沙漠化非常严重,形成了著名的毛乌素沙地,而其南部(地理学上划为黄土高原)陕西榆林地区的生态保护却取得了比较好的效果。榆林地区的经验能推广到毛乌素沙地的北部去吗?未必行得通。因为大致以陕北长城为界,鄂尔多斯盆地的南北两侧大地热流有明显的差别,北侧的地温梯度一般低于25 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$,而南边的地温梯度一般在25~35 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ^[13]。也就是说南边的榆林地区,其生态系统可以获得来自地面以下较多热能的温暖,逐步形成了暖温带森林草原生态系统;而北边的毛乌素沙地,其生态系统不得不承受太阳辐射日烤夜寒的煎熬,逐步演变成为半荒漠地带。这可能才是导致鄂尔多斯盆地生态系统出现南北分异的关键原因。因此在生态区评价中应更多地考虑地面以下的因素。

我们总是强调,水资源短缺是制约西部开发的主要因素,因而把目光集中在水资源的开发和南水北调工程上。现在我们指望的“大西线南水北调工程”完成后真的能够把西北的沙漠转变成为绿洲吗?美国人也曾经认为科罗拉多高原上的很大一片地区寸草不生是由于缺水的缘故,综合考虑下游防洪和水量调节的需要,美国国会于1956年批准立项修建了格林峡谷大坝(Glen Canyon Dam),到1969年水库蓄水就达到了设计水位,在高原上悬起了美国第二大人工湖泊,即鲍威尔湖(Lake Powell),但是,30多年后的今天,被冷水长期浸润的鲍威尔湖(Lake Powell)流域两岸仍然是寸草不生。而且水库蓄水后还使该流域的水生生态系统出现退化,物种减少,有5种鱼类已近于绝迹。为什么科罗拉多高原上的这片土地上会寸草不生呢?从美国大地热流等值线图^[27]上可以看出,该区正是美国大陆上大地热流最低的一个地带,也是美国大陆上范围较大的一片大地热流低值带,该高原的荒漠区域与大地热流低于60 mW/m^2 等值线范围基本吻合。在美国大地热流图上,另一片较大的大地热流低值地带是北美大陆中部密苏里河上游流域美加边境地带的一大片不毛之地,人称“恶土”(Badlands)。该区也不缺水,而是由于大地热流太低限制了生态体系的发育。由此看来,仅靠“南水北调”未必能够达到改善西部地区生态环境的目的。

种种迹象表明,区域大地热流的高低对区域生态系统的演化可能有重大影响。大地热流不仅影响区域气候的干湿程度,而且大地热流的高低决定了一个地区地表生态系统能量供给的下限,也决定了该区生态系统温度的下限,是区域生态系统发育与演变过程中一个重要的物种限制因子。它决定了一些地区生态系统物种的多样性。

来自地球内部的热流(大地热流)在不同地区的差异可能是导致不同地区地表生态环境呈现不同演变趋势的一个重要因素。这可能是控制地球表层不同地区生态环境背景的一个重要的区域性自然因素,它将直接影响到一个地区的生物发育、水文生态、冰雪消融、风化作用、土壤形成演化等,进而影响到区域生物的生产力,直接关系到这些地区的发展规划和生态环境建设。大地热流低可能是导致一些盆地生态体系发育不良,进而演变成为沙漠的重要原因。研究大地热流对生态环境退化的影响和机理

是了解生态体系和现代环境格局形成背景, 区分环境和生态演化中自然和人文因素的作用的一个重要内容。将为区域环境和生态建设以及管理决策提供科学依据。对比沙漠区与沙漠中绿洲地带的大地热流特征, 研究大地热流对沙漠形成与影响的机制, 将为寻求改造沙漠、防止沙漠扩张的有效途径开辟新的思路。认识到大地热流这一自然因素对生态系统演化的影响后, 我们对西线南水北调工程, 尤其是大西线南水北调工程的作用必须重新评估。

一个地区大地热流的格局和演变趋势与区域地壳和岩石圈的形成和演化有密切关系, 而良好的生态环境又是区域社会经济可持续发展的保障, 因此, 开展大地热流对生态环境退化影响的研究, 将架起固体地球科学与社会发展相联系的桥梁, 为地球科学直接服务于社会发展实践找到新的突破口, 可能带动提出一些新的基本理论和研究方法。

大地热流对生态系统演化的影响是一个全新的研究领域, 目前获得的认识是非常初步的, 也是十分肤浅的, 有些问题还需今后继续深入讨论和研究。

在收集资料过程中, 赵振华研究员给予了很多帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Pollack H N, Hurter S J, Johnson T R. Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set[J] *Review of Geophysics*, 1993, 31: 267~280.
- [2] 汪集旸, 孙占学. 神奇的地热[M]北京: 清华大学出版社, 2001.
- [3] 汪洋, 邓晋福, 汪集旸, 等. 中国大陆热流分布特征及热-构造分区[J] *中国科学院研究生院学报*, 2001, 18(1): 51~58.
- [4] Everham W D and Huntoon J E. Thermal history of a deep well in the Michigan Basin: Implications for a complex burial history[A] In: Merriam D and Forster A Eds. *Geothermics in Basin Analysis*[C] New York: Plenum Press, 1999. 177~202.
- [5] Cermak V and Rybach L. Terrestrial Heat Flow and the Lithosphere Structure[M] Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [6] Chapman D S, Pollack H N. Cold spot in West Africa: anchoring the African plate[J] *Nature*, 1974, 250: 477~478.
- [7] Chapman D S, Pollack H N. Heat flow and heat production in Zambia: evidence for lithospheric thinning in Central Africa[J] *Tectonophysics*, 1977, 41: 79~100.
- [8] Harris R N, and Chapman D S. Borehole temperatures and a baseline for 20th century global warming estimates[J] *Science*, 1997, 275: 1618~1621.
- [9] Huang S, Pollack H N, and Shen P Y. Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures[J] *Nature*, 2000, 403: 756~758.
- [10] 汪集旸, 汪缙安. 辽河裂谷盆地地壳上地幔热结构[J] *中国科学(B辑)*, 1988, 8: 856~866.
- [11] 王良书, 施央申. 油气盆地地热研究[M] 南京: 南京大学出版社, 1989.
- [12] 何丽娟, 熊亮萍, 汪集旸, 等. 莺歌海盆地构造热演化模拟研究[J] *中国科学(D辑)*, 2000, 30(4): 425~419.
- [13] Wang Jiyang, Li Naisheng, Wang Jianghai, et al. Geothermics in China[M] Beijing: Seismological Press, 1996. 1~299.
- [14] Prodehl C, St Mueller and Haak V. The European Cenozoic Rift System[A] In: Olsen K H(Editor), *Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics*[C] *Development in Geotectonics*. Elsevier, 1995.133~212.
- [15] Baldrige W S, Keller G R, Haak V et al. The Rio Grande Rift. In: Olsen K H(Editor), *Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics*[C] *Development in Geotectonics* 25. Elsevier, 1995.233~276.
- [16] Keller G R, Bott M H P, Wendlandt R F et al. The Baikal Rift System. In Olsen K H(Editor). *Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics*[C] *Development in Geotectonics* 25. Elsevier, 1995.325~344.
- [17] 马晓冰, 孔祥儒. 利用地球物理资料确定大地热流[J] *中国学术期刊文摘*, 1999, 5(8): 1030~1032.
- [18] 邱楠生. 中国大陆地区沉积盆地热状况剖面[J] *地球科学进展*, 1999, 13(5): 447~551.
- [19] 贝丰, 吴征, 宋振亚, 等. 鄂尔多斯盆地古生界含油气岩系有机岩石学研究及天然气生成条件与评价[M] 成都: 成都科技大学出版社, 1995.
- [20] 陈墨香. 华北地热[M] 北京: 科学出版社, 1988.
- [21] 汪缙安, 汪集旸, 熊亮萍, 等. 辽河断陷地热特征与油气资源[M] *中国科学院地质研究所集刊(5)*, 北京: 科学出版社, 1992.1~77.
- [22] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流分布及岩石圈热结构[J] *中国地球物理学会年刊(6)*, 北京: 地震出版社, 1990.219.
- [23] 王钧, 汪缙安, 沈继英, 等. 塔里木盆地的大地热流[J] *地球科学*, 1995, 20(4): 399~404.
- [24] 王社教, 胡圣标, 李铁军, 等. 准噶尔盆地大地热流[J] *科学通报*, 2000, 45(12): 1327~1332.
- [25] 熊亮萍, 胡圣标, 汪集旸. 中国东南地区实测热流值[J] *地球物理学报*, 1993, 36(6): 784~790.
- [26] 钟德才. 中国现代沙漠动态变化及其发展趋势[J] *地球科学进展*, 1999, 14(3): 229~234.
- [27] Morgan P and Gosnold W D. Heat flow and thermal regimes in the continental United States[A] In: Pakiser L C and Mooney W D (Editors). *Geophysical framework of the continental United States*[C] *Geol. Soc. Am. Mem.*, 1989, 172: 493~522.

Influence of the terrestrial heat flow on the evolution of the surface ecosystem and environment

KUANG Yao-qiu , HUANG Ning-sheng , ZHU Zhao-yu , HU Zhen-yu
(*Guangzhou Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guangzhou 510640 , China*)

Abstract Some puzzling problems in the development of the natural ecosystem and environmental evolution on the surface of the Earth lead the authors to consider the role played by the energy from the Earth's interior. Comparing the ecological feature with the terrestrial heat flow of the main geographic units all over the world , the authors find that the quality of the ecological environment all over the world is closely related with the values of the terrestrial heat flow in a region. The typical forest ecosystem always develops in regions where the terrestrial heat flow is quite high , while the typical desert ecosystem often develops in regions where the terrestrial heat flow is very low. The heat flow from the Earth's interior , which might not only influence the humidity of the regional climate , but also define the lower limit of the energy supply for the ground ecosystem , is considered to be an important limiting factor for species in the development and evolution of the ecosystem in a region. The low terrestrial heat flow may play a major role in the desertification of some large basins. Study on the mechanism and influence of the terrestrial heat flow on the degradation of the ecological environment , from which we will understand the background for the formation of the ecosystem and the environmental frame in a region and may distinguish the influence of human factors from natural factors on the evolution of the ecosystem and the environment , will provide a scientific basis for making decision in the management and construction of the ecological system and environment for a region.

Key words terrestrial heat flow ; ecological environment ; limiting factor ; climate change ; desertification