

熵产生和自然灾害^{*}

仪垂祥 史培军

(北京师范大学资源与环境科学系, 100875, 北京; 第一作者 38岁, 男, 副教授)

摘要 自然灾害的发生过程是不稳定能量积累的释放过程, 它是一个高强度的耗散过程, 耗散强度可以用局域熵产生来描述. 根据地表温度和能量通量纬度分布的观测资料计算了局域熵产生的纬度分布, 发现它与自然灾害的纬度分布十分接近. 据此研究了自然灾害纬带群聚性的成因机制. 同时, 对地球系统熵的收支分布和熵产生作了计算, 给出了它们的整体运作图像.

关键词 自然灾害纬带群聚性; 负熵流; 熵产生

分类号 X43; O414.14

自然灾害具有群聚性和群发性已为大量历史资料所证实^[1,2]. 这表征自然灾害的发生发展具有规律性. 本文以能量守恒定律和熵定律为基本理论依据, 对历史上自然灾害在中低纬度带群聚^[3]的成因机制作一初步的研究, 以期对自然灾害成因机制的理论研究有一个开端.

1 地球系统熵的收支分布

地球系统受能量守恒定律支配. 为了简单性, 选取地表温度 T 为状态变量, 系统内部的物理过程用它来参数化, 这通常归于一维能量平衡方程^[4~6],

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = f(T, x) - \frac{\partial}{\partial x} (1-x^2)^{1/2} F, \quad (1)$$

其中 $f(T, x) = R_i(T, x) - R_o(T, x)$ 称为辐射差函数, R_i 和 R_o 分别是吸收太阳辐射和逸出红外辐射, C 是热容量, F 是径向能流, $x = \sin \theta$, θ 是纬度.

熵定律是控制地球系统的另一重要定律. 为此我们研究地球系统的总熵变. 在南北半球对称的假定下, 只需讨论北半球即可. 它的总熵 S 可以写为

$$S = \int_0^1 dx s(x), \quad (3)$$

$s(x)$ 是熵密度. 按 Gibbs 关系, 有

$$ds = \frac{C}{T} dT. \quad (4)$$

为了方便, 引入算子

$$\nabla_x = \frac{\partial}{\partial x} (1-x^2)^{1/2}, \quad (5)$$

结合方程 (1)~(5), 并利用边界条件 $F=0$, $x=0, \pm 1$, 得到地球系统的总熵变

^{*} 国家自然科学基金重点资助项目

收稿日期: 1994-01-08

$$dS/dt = d_e S/dt + d_i S/dt. \quad (6)$$

其中 $d_e S/dt = \int_0^1 dx T^{-1} f(T, x)$ 代表地球系统与外界的熵交换, 称为熵流. 因为它是由地球系统与外界的辐射能交换所引起, 所以是一非耗散过程. 方程(6)的右边第2项

$$\frac{d_i S}{dt} = \int_0^1 dx F \nabla_x T^{-1} = \int_0^1 dx \sigma = P > 0 \quad (7)$$

为地球系统的熵产生, 而

$$\sigma = F \nabla_x T^{-1} \quad (8)$$

为局域熵产生. 它表述了地球内部能量输运的耗散过程^[7], 代表地球系统的局域耗散强度.

当地球系统处在稳恒态时, 它的总熵为一定常值, 故熵流

$$d_e S/dt = -P < 0 \quad (9)$$

是负定的, 这就是所谓的负熵流^[8,9].

现在研究地球系统熵的收支分布状况. 在地球系统处于稳恒态时, 它的辐射收支平衡, 即

$$\int_0^1 f(T, x) = 0. \quad (10)$$

从图1可以看到, 在近赤道区域 $f > 0$, 在近极地区域 $f < 0$. f 的纬度积分的绝对值等于2条辐射收支曲线所围的面积, 并且2个区域所围的面积相等^[12]. 如果用 x_0 表示2条辐射收支曲线相交的位置, 可以算得近赤道区域 ($x < x_0$) 的熵流

$$\Delta S_1 = \int_0^{x_0} dx T^{-1} f > 0 \quad (11)$$

为正熵流, 近极地区域 ($x > x_0$) 的熵流

$$\Delta S_2 = \int_{x_0}^1 dx T^{-1} f < 0 \quad (12)$$

为负熵流. 换句话说, 吸收辐射对熵流的贡献是正的, 逸出辐射对熵流的贡献是负的.

虽然地球系统的辐射收支平衡, 但它的熵的收支不平衡. 原因是近赤道区域的过剩能量在输运到近极地区域的过程中熵不断地被生产出来, 地球系统必须把这部分熵产生排放出去, 否则地球系统要向无序方向发展. 根据方程(9)、(11)和(12), 有

$$\Delta S_1 + P = -\Delta S_2. \quad (13)$$

方程(13)表示在近赤道区域 ($x < x_0$) 有熵流入地球系统, 在近极地区域 ($x > x_0$) 有熵流出地球系统, 且流出大于流入, 这个差值正好等于地球系统内部的熵产生(图2).

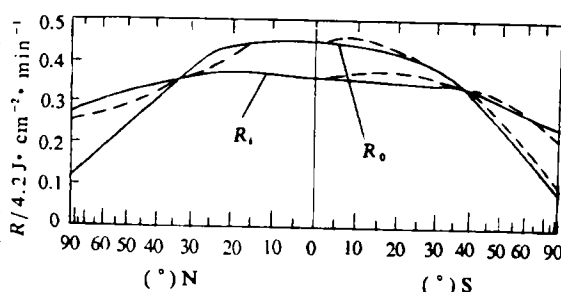


图1 纬度年平均辐射收支曲线

— 计算值; 卫星观测值

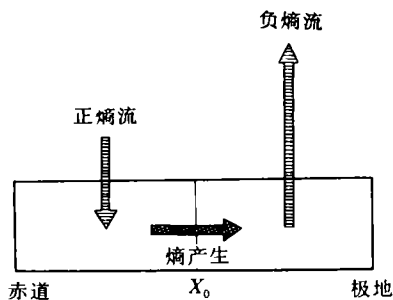


图2 地球系统熵的收支分布和熵产生的整体运作图像

x_0 是辐射收支曲线相交的位置

2 局域熵产生与自然灾异的纬带群聚性

局域熵产生 σ 的大小可以表示耗散的强度, 它的纬度分布具有重要意义. 为了计算 σ 的纬度分布, 我们首先要考虑能流 F 与温度梯度 $\nabla_x T$ 的关系. 它不能由第一性原理导出, 我们取 North^[4] 采用的线性参数化关系, 即

$$F = -\kappa \nabla_x T. \quad (14)$$

North 通过把 κ 调整到某一常数值, 由方程 (1) 解析地求得地表温度分布, 并与观测结果一致.

根据方程 (8) 和 (14), 有

$$\sigma(\theta) = F^2(\theta) / (\kappa T^2(\theta)). \quad (15)$$

这样, 根据能流 F 的观测值 (图 2) 和纬度年平均温度 T 的观测值^[3] 就能计算局域熵产生 σ 的纬度分布. 因为常数 κ 不改变 σ 纬度分布曲线的形状, 所以方便地把它取为 $42 \text{ ZJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{a}^{-1} \cdot (^\circ)^{-1}$. 计算结果示于图 4 (虚线).

图 5 是北半球历史上发生的许多重大自然灾害事件的分布图^[3], 它在纬带出现的频次 $\mathcal{N}$ 示于图 4 (实线).

从图 4 可以看到, 自然灾害的群聚纬带和局域熵产生的高值纬带一致, 这说明局域熵产生能够很好地表示自然灾害的耗散强度. 自然灾害的发生过程是不稳定能量的释放过程. 当地球系统的某个局部在一定的约束下有不稳定能量积累时, 那里的温度梯度就异常地增大. 仅当温度梯度增加

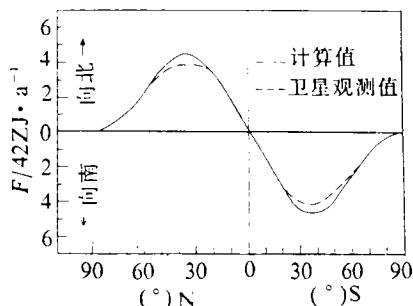


图 3 纬度年平均能流分布曲线

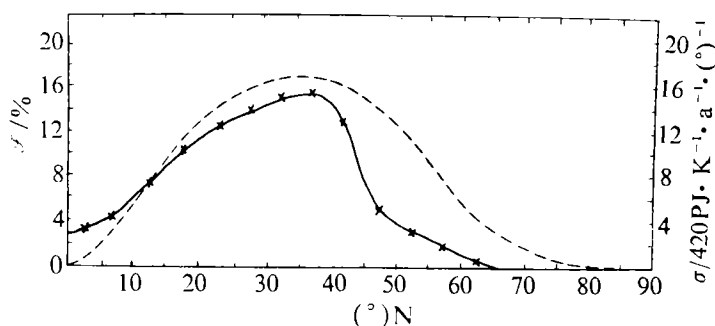


图 4 世界重大自然灾害频次和局域熵产生的纬度分布曲线

实线: 重大自然灾害频次; 虚线: 局域熵产生

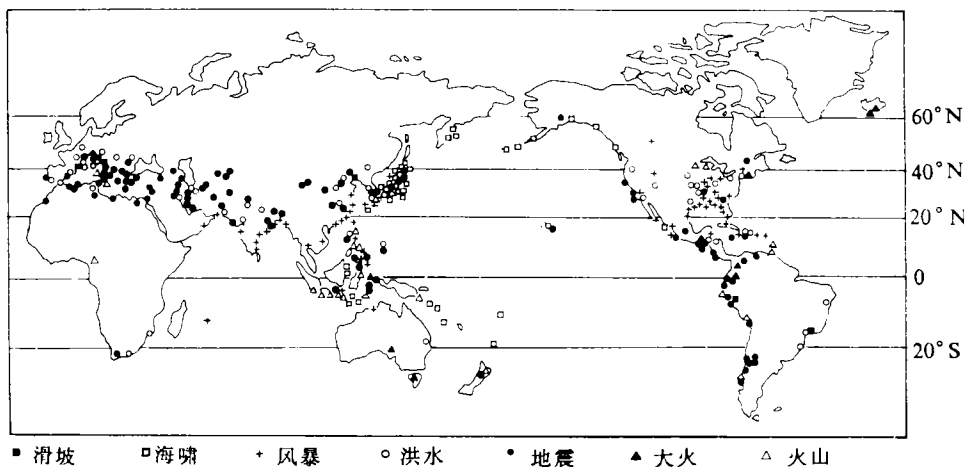


图 5 世界重大自然灾害分布图

到能冲破约束时, 不稳定能量才得以释放, 这时异常大的温度梯度导致了异常大的能流, 给人们带来灾害的正是这些异常大的耗散过程。

因此, 通过研究局域熵产生 σ 纬度分布不均的原因就能知道自然灾害纬带群聚的成因。 σ 纬度分布不均的原因来自于辐射收支局域不平衡, 使从赤道到极地的能量输运在 $25 \sim 45^\circ \text{N}$ 发展到最大, 致使自然灾害集中出现在这个纬度带。导致辐射收支局域不平衡的根本原因是太阳辐射的纬度分布不均, 它起因于天文因素, 所以地球系统重大自然灾害的出现与天文因素的变化有很好的相关性^[1]。另外, 地球系统内部的反馈相互作用也是影响辐射收支局域不平衡的重要原因。如冰盖反照率与温度的反馈会影响辐射收入, 温室气体影响辐射支出, 云同温度的反馈对辐射收支都有影响^[12]。

本文的结论是基于简单的一维能量平衡模型, 未能包含物质输运过程, 它在成灾的过程中也是重要的。在地球系统内部地貌差异大的区域会有强的能量输运和物质输运。如在海陆交界地带, 由于海陆的贮能能力不同会有强的能流和物质流, 自然灾害也就在沿海地带集中出现, 像沿海的台风和风暴潮等就是典型的例子。

按统计物理学熵可以解释为系统无序度的量度, 系统向有序方向发展必须有负熵流输入。有生命存在的多样化的地球系统在向有序方向发展。从我们的结果(图2)可以看到它从外界获取巨大负熵流, 这负熵流的大小取决于熵产生, 而熵产生又可以表示灾害的强度。所以只有灾变才能使地球系统向有序方向发展, 使地球系统向文明进化。对月球系统, 由于它的表层不存在流体物质, 它的局域辐射收支近于平衡, 也就没有由能量和物质输运引起的熵产生, 因此没有负熵流。这是月球为一个简单均一的无序星体的原因。

用局域熵产生描述自然灾害发生过程的耗散强度是本文的一个基本观点, 它有深厚的物理基础和理论根据。从图4看到用径向能流和地表温度的观测值算得的局域熵产生纬度分布与北半球重大自然灾害的纬度分布有很好的相关性。它表明局域熵产生是可以用来描述自然灾害耗散强度的。我们认为在南半球没有重大自然灾害在中低纬度群聚的现象是由于南半球大部是海洋, 缺少历史记录的结果。从图3可以看到在南半球中低纬度高强度的能流是存在的。另一方面, 从包括大气和海洋的一维能量平衡方程出发来研究多种自然灾害的群聚现象有些简单化了。海啸、洪水、风暴、大火和滑坡泥石流等灾害可以看作是流体地球不稳能量积累释放的结果, 而火山爆发和地震是固体地球不稳能量释放的结果。后者虽然没有明确地包括在方程(1)中, 但它们是由流体地球的能量变化诱发的。例如, 因为赤道-极地温差的变化(常由天文因素引起)会引起海平面的升降及冰界的进退, 这种物质在径向的重新分布会改变地球的转动惯量, 由此会引起地球角速度的变化。地球角速度的变化是诱发火山爆发和地震的重要原因^[14, 15]。同时, 一些研究结果^[16~18]表明地震活动与旱涝存在着较好的相关性。多种自然灾害相互激发的连锁机制还需要比较复杂的模型来进一步完成。这是我们正在着手解决的问题。

3 参考文献

- 1 任振球, 全球变化: 地球四大圈异常及其天文成因, 北京: 科学出版社, 1990. 63~193
- 2 史培军, 灾害研究的理论与实践, 南京大学学报(自然科学版), 1991(自然灾害成因与对策专辑): 37
- 3 IDNDR. Confronting natural disaster. Washington, D C: National Academy Press, 1987. 11~13
- 4 North G R. Analytical solution to a simple climate model with diffusive heat transport. J Atmos

- Sci, 1975, 32: 1 301
- 5 Ghil M. Climate stability for a Sellers - type model. J Atmos Sci, 1976, 33: 3
- 6 Nicolis G, Nicolis C. On the entropy balance of the earth - atmospheric system. Quart J R Met Soc, 1980, 106: 691
- 7 Yi Chuixiang. Entropy in the atmospheric system. Chinese J Atmos Sci, 1989, 13: 375
- 8 陈之荣. 地球系统不可逆过程的熵解释. 自然杂志, 1990, 13: 156
- 9 李德虎, 杨东华. 负熵是什么. 自然杂志, 1990, 13: 203
- 10 London J, Sasamori T. Radiative energy budget of the atmosphere. In: Matthews W H, Kellogg W W, Robinson G D, eds. Man's impact on the climate. [s.l.]: MIT Pres, 1971. 141 ~ 155
- 11 Vonder Haar T H, Suomi V E. Measurements of the earth's radiation budget from satellites during a five - year period. J Atmos Sci, 1971, 28: 305
- 12 仪垂祥. 气候变化与气候模型. 北京: 海洋出版社, 1993. 167 ~ 195
- 13 Ghil M. Climatic variations and variability: facts and theoreies. [s.l.]: [s.n.], 1981. 461 ~ 480
- 14 赵铭. 地球自转速率与中国大陆地震韵律的关系. 科学通报, 1990(18): 1 402
- 15 郑大伟, 叶民权. 地球自转运动与新疆灾害性地震. 科学通报, 1990(8): 619
- 16 陈玉琼. 我国东半部近五百年旱涝变化与地震活动. 科学通报, 1983(11): 678
- 17 汤懋苍, 张建, 杨良. 江河丰枯与我国地震的相关分析. 中国科学, 1992(8): 889
- 18 叶民权. 新疆乌恰三次大地震与某些环境因子的关系. 科学通报, 1988(13): 1 007

ENTROPY PRODUCTION AND NATURAL HAZARDS

Yi Chuixiang Shi Peijun

(Department of Resources and Environmental Sciences, Beijing Normal University, 100875, Beijing, PRC)

Abstract The concentration of heavier assorted natural hazards in the Northern Hemisphere between latitude belts ($25 \sim 45^{\circ} \text{N}$) has been demonstrated by many historical data, however, the causes have not been clear. Natural hazards are defined as the processes of releasing unstable accumulated energies, and also the stronger dissipative processes, which can be described by the local entropy production. The latitudinal distribution of the local entropy production can be calculated from equations derived from the dissipative structure theory and data acquired by satellite. It's found coinciding closely with the occurrence of the latitudinal distribution of heavier natural hazards. This leads to the conclusion that the local imbalance between incoming radiation and outgoing radiation is responsible for the natural hazards which occur in the latitude belts. Natural hazards result from interactions among four spheres of the Earth and are induced by astronomical factors. The correlation between natural hazards and astronomical factors can be explained.

Keywords natural hazards; negative entropy flow; entropy production