

高地降温效应与构造-气候旋回

张信宝^{1,2}, 贺秀斌¹, 汪阳春¹, 张云奇^{1,3}

(1. 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;

2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 基于辐射平衡的原理, 提出“高地降温效应”假说, 阐明高原隆升与全球气候变冷的机制。地球如同被玻璃(大气层)包裹的、接受太阳辐射的球体, 这层玻璃易于太阳短波的透入, 不易于地面长波的散出, 起到了很好的保温作用。玻璃越厚, 保温效果越好, 地球表面的热能量水平越高, 地面温度也越高; 反之, 地面温度越低。估算了青藏高原和同纬度长江中下游平原之间的逆辐射量差值, 用以表征高原隆升的逆辐射量减少值, 进而又估算了全球高原隆升的逆辐射量减少值及占地球接受太阳辐射总量的比例。“高地降温效应”假说可以较好的解释寒武纪以来三次重大的构造运动-地貌演化-气候变化过程。构造运动形成高大山系和高原, 引起全球降温, 气候变冷; 随着隆升的山系和高地逐渐被侵蚀为低地, 地球表面变得平坦, 全球大气层的温室效应增强, 全球复又升温, 气候变暖。青藏高原的形成, 如同地球开了一个散热的“天窗”, 对新生代以来全球的持续降温作出了重要的贡献。

关键词: 高地; 降温效应; 地球; 构造; 地貌; 气候

中图分类号: P90 X14

文献标识码: A

已有的研究表明, 地质历史时期存在构造-气候旋回, 寒武纪以来的全球三次重大的气候变冷事件均对应于重要的构造运动, 如古生代冈瓦拉大陆有冰川发育的奥陶纪、志留纪冷期和石炭纪、二叠纪冷期分别对应于加里东运动和海西运动, 中生代以来的全球降温对应于喜马拉雅运动(图1)^[1]。除宇宙成因假说外, 一些学者提出了构造运动影响全球气候变化的假说。如汤懋苍的大气热机效率变化说认为^[2-4], 造山运动形成的大起伏地形, 有利于高效大气环流系统(高原季风)的形成, 导致全球热机效率增大, 极赤温差加大, 极地和 high 纬大降温, 出现大冰期。Ruddiman 和 Raymo 的隆升区化学风化说认为, 造山运动形成的隆升区侵蚀强烈, 硅酸盐化学风化消耗大量的 CO₂, 导致大气 CO₂ 含量降低, 大气层的温室效应功能减弱, 全球气候变冷^[5-9]。

本文基于辐射平衡的原理, 提出“高地降温效应”假说, 阐明高原隆升与全球气候变冷的机制。

文章估算了青藏高原和同纬度长江中下游平原之间的逆辐射量差值, 用以表征高原隆升的逆辐射量减少值, 进而又估算了全球高原隆升的逆辐射量减少值及占地球接受太阳辐射总量的比例, 最后用“高地降温效应”假说解释了显生界以来三次重大的构造运动-地貌演化-气候变化过程。

1 基本原理

地球表生过程是靠太阳辐射能维持的, 来自地球内部的热能同太阳的辐射能相比微不足道。地球表面接受的太阳能和向空间辐射出去的能量相等时, 地球的热能量水平不变, 全球整体温度稳定。前者大于后者时, 地球的热能量水平增加, 全球平均温度升高; 后者大于前者时, 地球的热能量水平减少, 全球平均温度降低。地球热能量水平高时的气候应较水平低时的温暖。全球的辐射能量平衡见图

收稿日期 (Received date): 2006-12-01; 改回日期 (Accepted): 2007-05-08.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (40599421, 40271015) [Natural Science Foundation of China (No. 40599421, 40271015)]

作者简介 (Biography): 张信宝 (1946-), 男, 汉, 江苏镇江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: zxbao@ind.ac.cn [Zhang Xinbao (1946-), Male, Professor & Doctor adviser. Main research field: soil erosion and conservation.]

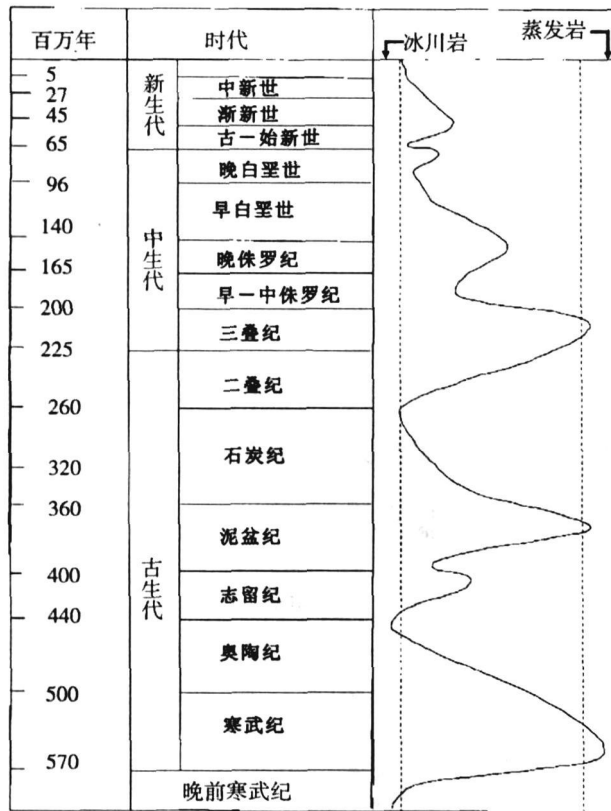


图 1 寒武纪以来蒸发岩和冰川的最大值^[1]

Fig 1 Maximum values of evaporate and glaciers since Cambrian Period

2^[10]。太阳辐射能以短波形式从大气圈层顶部进入地球表面, 全球总量以 100 计, 地面(陆地 + 海洋表面)吸收的占 50%; 总反射损失(散射、云、地面)占 32%, 总吸收损失(分子、尘埃、云)占 18%。分子、尘埃和云吸收的辐射能随这些物质沉降到地面被地面吸收, 因此地面的总吸收能量占从大气圈层顶部进入的太阳辐射能的 68%。地面拥有的热能通过长波辐射不断耗散到大气上层, 不分昼夜持续进行。地面的辐射平衡为, 地面辐射总量 98%, 其中直接向空间辐射的损失 8%, 大气中的辐射损失 90%。大气中的辐射损失绝大部分(77%)又返回地面, 被称为逆辐射, 只有 13% 进入空间, 地面辐射净支出为 21%。地面的热支出为 29%, 包括大气骚扰运动向上的显热传输(9%)和水汽蒸发向上的潜热传输(20%), 加上分子、尘埃和云吸收的辐射能转化的热能 18%, 地面热能净支出为 47%。地面辐射净支出和热能净支出之和为 68%。

逆辐射是大气吸收的地面辐射能部分又被辐射返回到地面的过程, 全球的逆辐射能量占太阳辐射能总量的 77%。显然, 逆辐射能量占太阳辐射能总量的比例高时, 地球的热能量处于高水平, 地球表面

温度高; 比例低时, 地球的热能量处于低水平, 地球表面温度低。大气对太阳短波辐射透入的影响远大于对地面长波辐射散出影响。大气成分不变的情况下, 大气层越厚、空气密度越大, 大气层的保温效果越好; 反之, 越差。和低地相比, 高地空气稀薄, 大气层厚度小, 因此大气层的保温效果差, 气温低, 昼夜温差大。一般每上升 100 m, 温度降低 0.6℃。若无大气环流从低地向高地输送热能, 高地的气温可能还要低, 昼夜温差更大。

由于太阳光线入射地球表面的角度不同, 从大气圈层顶部进入地球表面的太阳辐射能, 赤道一带最高 $130 \times 10^4 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{a})$, 随纬度的增加逐渐减少, 极地一带仅 $130 \times 10^4 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{a})$ ^[10]。低纬地区接受的太阳辐射能高于高纬地区, 因此高纬地区较低纬地区寒冷; 同纬度低地和高地接受的太阳辐射能是相等的, 但低地的逆辐射量大于高地, 因此高地较低地寒冷。不考虑大气环流的热能传输补给影响, 将年均温相近的高纬低地和低纬高地的地面热能量水准视为基本一致, 并以此估算低纬高地和低地的逆辐射量差值。如西藏那曲地处北纬 31.5°, 海拔 4500 m, 年均温 -0.9℃; 黑龙江黑河地处北纬 50°, 海拔 50 m, 年均温 -0.5℃。二地的纬度相差 18.5°, 高程相差 4450 m, 但年均温相近。长江中下游平原的纬度和西藏那曲一致, 海拔和黑龙江黑河相近。这里借用西藏那曲和黑龙江黑河因纬度差异而引起的太阳辐射能差值, 表征西藏那曲与同纬度低海拔的长江中下游平原之间的逆辐射量差值。北纬 31.5°和 50°的太阳辐射量分别为 $113 \times 10^4 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{a})$ 和 $921 \times 10^3 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{a})$ ^[10]。这也就是说, 海拔 4500 m 的西藏那曲的逆辐射量较同纬度海拔数米 - 数十米的长江中下游平原少 $209 \times 10^3 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{a})$, 占那曲太阳辐射能的 18.5%。显然, 高地的逆辐射量低于同纬度的低地。

2 中低纬高地的全球降温效应

全球北纬 40°~ 南纬 40°的中低纬地区的平均海拔 > 1000 m 的高原, 主要有亚洲的青藏高原、云南高原、帕米尔高原、伊朗高原、亚美利加高原和安纳托利亚高原; 非洲的埃塞俄比亚高原和东非高原; 北美洲的科罗拉多高原和墨西哥高原; 南美洲的玻利维亚高原和厄瓜多尔高原。其中青藏高原是全球面积最大的高海拔高原, 面积 $2.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, 平均高

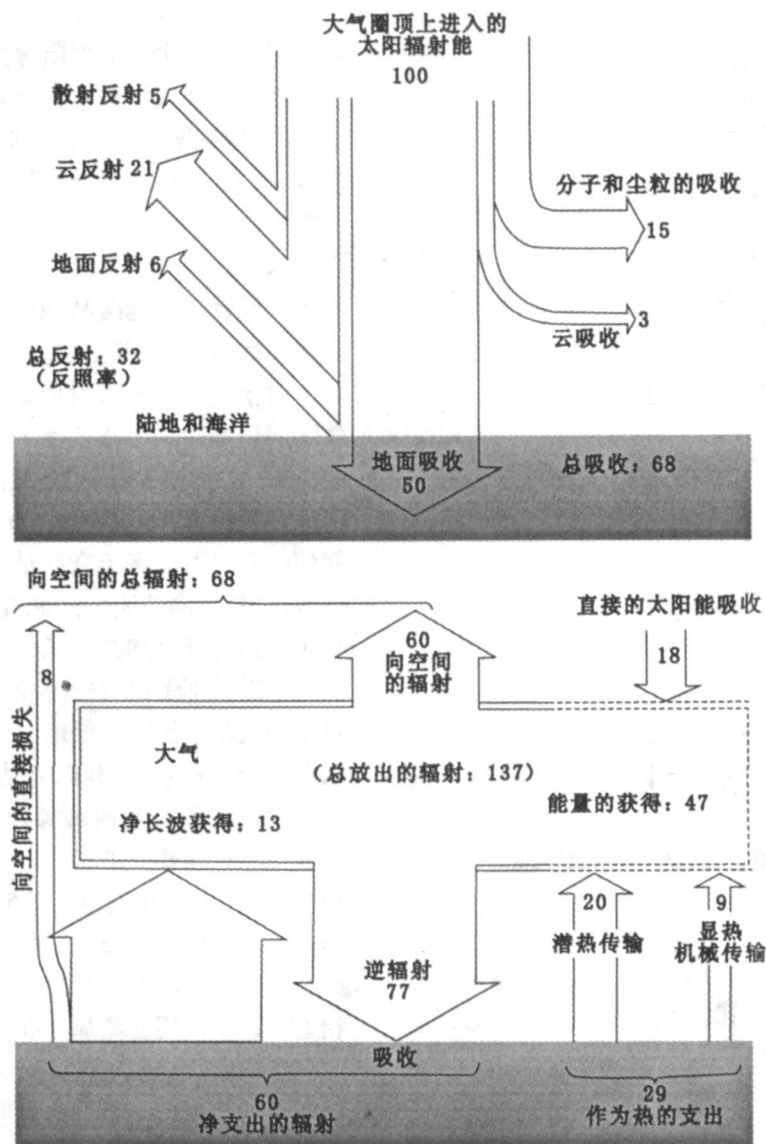


图 2 全球辐射能量平衡示意图^[10]

Fig 2 Schematic diagram of global radiation and energy balance

表 1 全球中、低纬地区平均海拔 ≥ 1 000 m 的主要高原

Table 1 Global major plateaus in mid and low latitude with altitude below 1000m

洲	高原	平均高程 (m)	面积 (km ²)
亚洲	青藏高原	4 500	2.3 × 10 ⁶
	云南高原	2 000	3 × 10 ⁵
	帕米尔高原	4 000	1 × 10 ⁵
	亚美尼亚高原	2 000	3 × 10 ⁵
	安纳托利亚高原	1 000	5 × 10 ⁵
南美洲	伊朗高原	1 300	2.5 × 10 ⁶
	玻利维亚高原	3 800	3.5 × 10 ⁵
	厄瓜多尔高原	3 000	1.5 × 10 ⁴
北美洲	科罗拉多高原	1 800	5 × 10 ⁵
	墨西哥高原	2 000	3.5 × 10 ⁵
非洲	东非高原	1 200	1 × 10 ⁶
	埃塞俄比亚高原	2 200	4.5 × 10 ⁵

程 4 500 m(表 1)^[11]。笔者在“地带性与非地带性夷平面”一文中已经指出,冰缘气候带的高程随着纬度的增加而逐渐降低,低纬地区的寒冻夷平面高程大于高纬地区,因此高海拔的高原多分布于低纬地区^[12]。全球高大山系往往伴随高原分布,多分布于高原的边缘或内部。如青藏高原南缘的喜马拉雅山,北缘的阿尔金山和昆仑山,和内部的冈底斯山和唐古拉山等。

全球高大山系和高地的空间分布格局是中生代以来板块运动的结果。中生代时期, N10°左右的特提斯海横亘于劳亚古陆和冈瓦拉古陆之间,特提斯

海两侧的 N40°-S40°的中低纬地区,地势平坦,气候炎热干燥。晚白垩纪末(65×10^6 a)以来,由于冈瓦拉古陆分裂出来的印度板块、非洲板块和南美板块等三个板块的向北漂移,特提斯海消亡,现仅残留南欧和北非之间的地中海。印度板块和非洲板块向北漂移,与劳亚古陆分裂出来的欧亚板块碰撞,导致亚洲青藏高原、帕米尔高原、伊朗高原和土耳其高原及相邻山系的形成;南北美洲西部中低纬高原和高大山系的形成与太平洋板块的向东俯冲、东非中低纬高原的形成与印度洋海底扩张有关(图 3)^[13]。

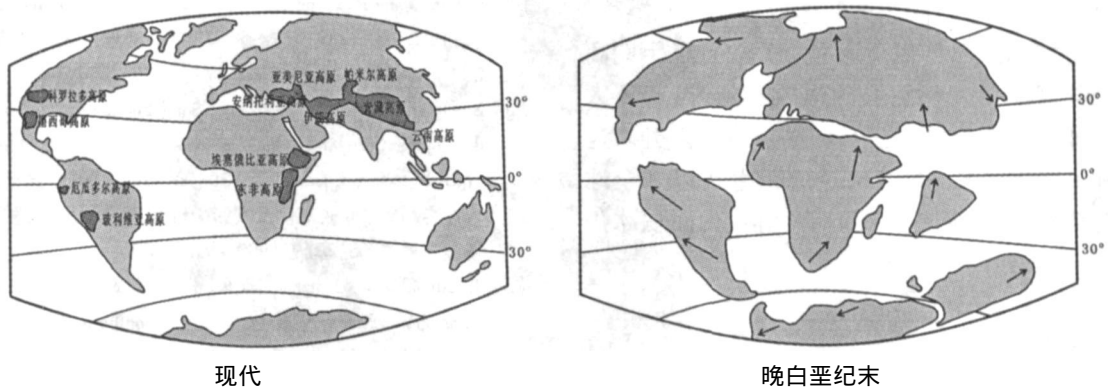


图 3 中、低纬高海拔高原位置,现代和晚白垩纪末海陆位置^[13]

Fig 3 Locations of high-elevation plateaus at mid and low latitude locations of lands and seas in modern and late Cretaceous end periods

现今的中低纬高地是晚白垩纪末(65×10^6 a)以来构造运动和地表剥夷侵蚀的综合结果。根据古地理分析^[13],可以大致判断现代高地晚白垩纪末时的自然地理环境和推断当时的地面高程,从而粗略估算高地隆升导致的逆辐射量减少量(降温效应),和对全球地面热能量水平降低的贡献。以下简要计算青藏高原隆升的降温效应。晚白垩纪时,青藏高原北部已经成陆,南部仍为海洋,当时的地面(海面+陆面)平均高程高出海平面有限。青藏高原现今平均高程 4 500 m,也就是说晚白垩纪末以来青藏高原隆升了接近 4 500 m。计算高原隆升的逆辐射量减少量时,不考虑由于印度板块推挤,青藏高原向北移动引起的纬度变化,也不考虑大气环流的热能传输影响。假定晚白垩纪末青藏高原的海拔和现今长江中下游平原相当,西藏那曲代表了青藏高原的平均辐射情况,这样根据前述西藏那曲与长江中下游平原的逆辐射量差值 209×10^3 J/($\text{m} \cdot \text{a}$),可以计算晚白垩纪末以来青藏高原隆升引起的逆辐射量平均减少值。青藏高原面积 2.3×10^6 km^2 ,晚白垩纪末

以来高原隆升引起的逆辐射量总减少值 48×10^{20} J/a,占青藏高原太阳辐射总量 26×10^{21} J/a 的 18.5%,相当于全球接受的太阳总辐射量的 7.1‰。假定青藏高原逆辐射量减少值为全球高地的 1/10,全球高地隆升引起的逆辐射量总减少值占地球太阳总辐射量的 7.1‰,若考虑大气环流从低地向高地的热能传输补给,全球高地新生代隆升引起的逆辐射量总减少值占地球太阳总辐射量的比例远大于此值。

3 构造运动-地貌演化-气候变化

图 1 中,全球冰川岩和蒸发岩沉积量的变化很好地反映了显生界以来全球气候的变化,寒武纪、泥盆纪和三叠纪蒸发岩沉积量最大,是全球气候的三个温暖期;古生代的奥陶纪、志留纪和石炭纪、二叠纪的界线邻近时期及新生代的第四纪有冰川岩出现,为全球气候的三个寒冷期。如前所述,这三个温暖期向三个寒冷期过渡的时期,分别对应于加里东

运动、海西运动和喜马拉雅运动。以下用“高地隆升的全球降温效应”理论,解释以上的构造-气候旋回现象。构造运动导致山系隆升和高地的形成,大量山系和高地的隆升,势必导致全球温室效应减弱,逆辐射量的减少,全球降温,气候变冷;构造运动停歇后,隆升的高地和山系逐渐被侵蚀为低地,全球温室效应增强,逆辐射量增加,全球升温,气候变暖。古生代加里东和海西二次强烈的造山运动,形成了北半球统一的劳尔大陆,这二次造山运动在北半球形成的高山和高地,导致全球温室效应减弱,逆辐射量减少,全球降温,贡瓦纳大陆奥陶纪、志留纪和石炭纪、二叠纪出现冰川。中生代以来的喜马拉雅运动导致贡瓦纳大陆分解、非洲和印度板块向北漂移,特提斯海消亡和亚洲青藏高原、帕米尔高原、伊朗高原和土耳其高原及相邻山系的形成和隆升;和环太平洋山系和非洲中低纬地区高原的形成和隆升。这些山系和高地的形成和隆升,造成新生代以来全球波动性持续降温,第四纪南北半球均有大面积冰川出现。

4 结语

地球如同被玻璃(大气层)包裹的、接受太阳辐射的球体,这层玻璃易于太阳短波的透入,不易于地面长波的散出,起到了很好的保温作用。玻璃越厚,保温效果越好,地球表面的热能量水平越高,地面温度也越高;反之,地面温度越低。构造运动形成的高大山系和高原,大气层薄(玻璃薄),如同散热的“天窗”,易于地面热能以长波的形式向宇宙散出,逆辐射量低,温室效应差。地球大面积高海拔山系和高原的出现,势必要引起全球降温,气候变冷;随着隆升的山系和高地逐渐被侵蚀为低地,地球表面变得平坦,全球大气层的温室效应增强,全球复又升温,气候变暖。青藏高原的形成,如同地球开了一个散热的“天窗”,对新生代以来全球的持续降温作出了重要的贡献。

致谢:感谢刘东生,安芷生院士和张德二研究员的鼓励。

参考文献 (References)

- [1] L. A. Franks. Climates Throughout Geological Time [M]. Elsevier Scientific Publishing Company, 1979: 1~310
- [2] Tang Maocang, Zhu Deqin, Gao Xiaoning. Review and prospect of the research of earth system's evolution [J]. *Advance in earth sciences*, 2004, 19(1): 55~62 [汤懋苍, 朱德琴, 高晓清. 地球系统演化原因研究的回顾与展望 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 55~62]
- [3] Tang Maocang, Guo Weidong. The great ice age cycles associated with the variation of the atmospheric heat engine efficiency [J]. *Science in China (D)*, 1998, 28(3): 284~288 [汤懋苍, 郭维栋. 大冰期成因的大气热机效率变化说 [J]. 中国科学 D 辑, 1998, 28(3): 284~288]
- [4] Tang Maocang, Dong Wenjie. A new view point on the causes of formation of the great ice age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(14): 1203~1205 [汤懋苍, 董文杰. 对地球大冰期成因的新看法 [J]. 科学通报, 1997, 42(7): 723~725]
- [5] Zhang Qiang, Hang Yongxiang, Song Lanchun. The summarize of development of global climate change and its effect factors [J]. *Advance in earth sciences*, 2005, 20(9): 990~998 [张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 990~998]
- [6] Ruddiman W. F., Kutzbach J. E. Forcing of late Cenozoic northern hemisphere climate by plateau uplift in southern Asia and the American [J]. *Geophys Res*, 1989, 94(18): 409~427
- [7] Ruddiman W. F., Kutzbach J. E. Late Cenozoic Plateau Uplift and Climate Change [M]. Trans R Soc Edinburgh Earth Sci, 1990, 81, 301~314
- [8] Ruddiman W. F. Tectonic Uplift and Climate Change [M]. Plenum Press, New York, 1997: 3~5151
- [9] Raymond E., Ruddiman W. F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate [J]. *Nature*, 1992, 359(6391): 117~122
- [10] A. N. Strahler & A. H. Strahler. Modern Physical Geography [M]. John Wiley & Sons, New York, 1978: 560
- [11] Mao Hangying, Wang Shouchun. Enchiridion of World Physical Geography [M]. Beijing: Knowledge Publishing House, 1984: 428 [毛汉英, 王守春. 世界自然地理手册 [M]. 北京: 知识出版社, 1984: 428]
- [12] Zhang Xinbao, Zhou Liping, Wang Yangchun, et al. Zonal and non-zonal planation surfaces [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(1): 93~99 [张信宝, 周力平, 汪阳春等. 地带性与非地带性夷平面 [J]. 第四纪研究 [J]. 2006, 26(3), 1~7]
- [13] Wang Hongzhen, Liu Benpei. Earth History Course [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 352 [王鸿祯, 刘本培. 地史学教程 [M]. 北京: 地质出版社, 1980: 352]

Highland Effect on Cooling the Earth and Tectonic-Climate Cycling

ZHANG X inbao^{1,2}, HE X iubin¹, WANG Y angchun¹, ZHANG Y unqi^{1,3}

(1 Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, 610041, China;

2 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an, 710075, China;

3 Graduate University, CAS, Beijing, 100049, China)

Abstract Based on radiation balance on the earth surfaces, a hypothesis on “highland effect on cooling the earth” is proposed in this paper to interpret relationships between highland uplifting and climate cooling in the earth. The earth looks like a ball, which is wrapped by atmosphere (glass) and receives solar radiation. Solar shortwaves are easy to penetrate through the glass into the earth surfaces, but longwave from the earth surfaces are not easy to penetrate through the glass back to the space. Atmosphere (the glass) keeps earth warm and the process is called greenhouse effect. The earth surfaces covered with thicker atmosphere layers are warmer than the surfaces with thin layers. The difference of counter radiation between the Tibet Plateau and the Middle and Lower Reach Plain of the Yangtze River is assessed to represent the reduction of counter radiation due to the plateau uplifting. The reduction of counter radiation due to uplifting of major high plateaus over the world and its ratio to the total solar radiation on the earth are also estimated. Three major processes of tectonic movement-geomorphology evolution-climate change since Cambrian Period can be reasonably interpreted by the hypothesis on “highland effect on cooling the earth”. Tectonic movements result in formations of high mountains and plateaus, which results in cooling the earth. As the high mountains and plateaus are eroded to a low flat land, the greenhouse effects strengthen and the earth becomes warm. Formation of the Tibet Plateau likes to open a “skylight” to release heat and has made great contribution to cooling the earth since Cenozoic Era.

Key words highland; cooling effect; the earth; tectonics; geomorphology; climate