

南极冰盖的形成与消融对全球大地水准面与海面的影响*

张赤军 陆洋

(中国科学院测量与地球物理研究所 武汉 430077)

提要 采用球函数表征了南极冰川覆盖的高度,并运用位理论与地壳均衡观念,研究了南极冰盖形成、消融对大地水准面与相对海面的影响。结果表明,冰盖形成后的大地水准面发生了明显变化,在南极为 +115m,在南纬 25°带上为 -37m,在北极为 +8m;若地壳为弹性固体而地幔为流体,设地幔密度为 3 270kg / m³,则在冰川消融、地壳均衡调整后的沿海大陆相对海面的变化仅为 2.8m。

关键词 南极冰盖 大地水准面 相对海面

学科分类号 P731

南极冰盖占全球冰盖近 90%,它的形成与消融对全球大地水准面与相对海面产生了重大影响,近二三十年来,这一问题除引起海洋、气象、环境与灾害等方面的关注外,大地测量界也为之瞩目,Kivioja(1967),Bretterbaner(1990)等做了很有意义的工作。Bretterbaner指出,该问题似乎与巨大质量迁移有关。本文在前人的基础上,以冰盖的空间分布代替文献(Kivioja,1967)的点质量分布,从而使地球大地水准面变化的确定更符合实际;同时以固体地壳和壳下流体介质在补偿面上处于静力平衡的观念,估计了全球相对海面的变化,该结果比文献(Kivioja,1967)更趋于合理。

1 南极的冰厚及其球函数表示

据一些文献报道南极洲在海平面以上绝大部分为冰体所覆盖,而岩石所占比例不到总面积的十分之一(杜巴赫等,1972;张青松,1988)。本文为讨论方便起见,设该区在海面之上全为冰盖,由 Seyawa 等(1980)给出的地形高可知(见图 1a),其分布大致与极点相对称,最高处离极点也不远。形成中部高、四周低的地势。为便于问题的讨论,将用球函数拟合冰盖的高程 $H(\theta, \lambda)$, θ 为余纬, λ 为经度。显然,它的球函数展开式为

$$H(\theta, \lambda) = \sum_{M=2}^N H_n(\theta, \lambda) = \sum_{n=2}^N \sum_{M=2}^N (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta)$$

$$A_{nm} = \frac{(n-m)! 2n+1}{(n+m)! 4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} H(\theta, \lambda) \cos m\lambda P_{nm}(\cos \theta) \cos \theta d\theta d\lambda$$

* 南极考察委员会课题资助项目, 85-03-01号。张赤军,男,出生于 1933 年 9 月,硕士导师,研究员, Fax:0086-027-6783841

收稿日期:1995-02-22, 收修改稿日期:1997-08-25

$$B_{nm} = \frac{(n-m)!2n+1}{(n+m)!4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} H(\theta, \lambda) \sin m\lambda P_{nm}(\cos\theta) \cos\theta d\theta d\lambda$$

式中, A_{nm}, B_{nm} 为第 n 阶 m 次地形高系数, $P_{nm}(\cos\theta)$ 为连带勒让德函数。将上式展开到 180 阶次, 其图形如图 1b 所示, 它与原始数据 (图 1a) 之差约为 40m。

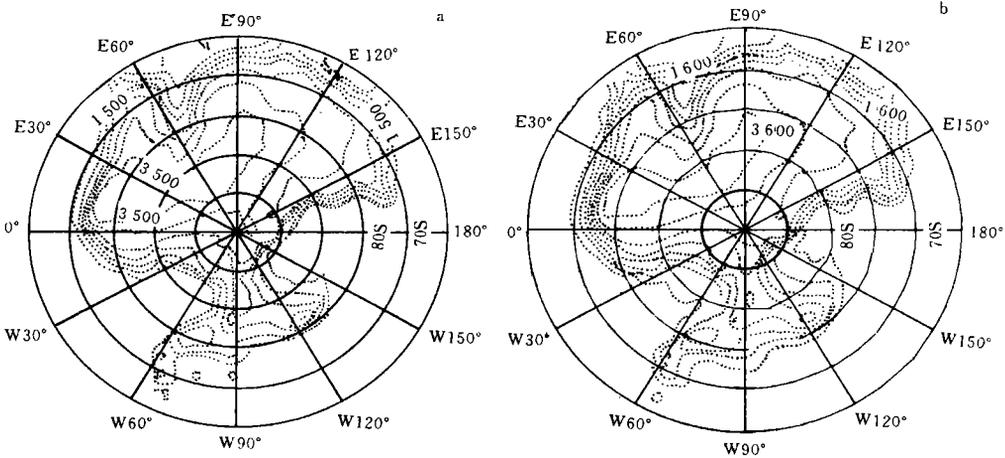


图 1 南极的地形 (a) 与球函数表达的南极地形 (b) (单位: m)

Fig.1 Antarctic topography (a) and Antarctic topography based on harmonic expressions (b) (elevation in m)

2 冰盖对大地水准面的影响

设厚为 $H(\theta, \lambda)$ 的冰盖压缩为层面, 其面密度为 $\delta_i H$, δ_i 为冰体密度。它所产生的重力效应为 δg_H 可以近似地以下式表示, 即 $\delta g_H = 2\pi G \delta_i H$, $\delta_i = 1030 \text{ kg/m}^3$, G 为引力常数。

由球面上的 Stokes 公式, 可以得到冰盖引起的大地水准面的效应 δN , 且: $\delta N = \frac{R}{4\pi r} \int_0^\pi$

$$\int_0^{2\pi} \delta g_H S(\psi) d\sigma, \quad d\sigma \text{ 为面元, Stokes 函数: } S(\psi) = \sum_{n=2}^N \frac{2n+1}{n-1} P_n(\cos\psi), \quad P_n(\cos\psi) \text{ 为勒让德多$$

项式; ψ 为球面角距, R 为地球半径; γ 为正常重力值; 根据球函数加法和正交定理, 上式可

化为: $\delta N = 0.0199 \sum_{n=2}^N \frac{1}{n-1} H_n$, H_n 为第 n 阶球函数, 其表达式可由前式得到, 这里 n 取至

180, H_n (单位: m), $\delta g_H, \delta N$ 的结果见图 2a, b。由此看出, 冰盖形成后对大地水准面产生效应主要在南半球, 且在南极为最大, δN 值达 138m, δg 达 $119 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 为何出现这一现象? 这是因为质量最集中在这一地区, 故其重力效应等为最大。而 δg 的最小值在 45°S 左右, δN 的最小值在 25°S 附近, 它在北极地带的效应也为可观, δN 可达 14.8m, δg 达 $5.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

南极冰盖的总质量为 $2.7 \times 10^{19} \text{ kg}$, 它是由占全球 70% 面积以上海水蒸发冷凝而成, 这相当于海洋上厚为 59m 的海水质量, 它将使全球大地水准面平均减少近 23m。因此, 洋区大地水准面的变化可粗略地用 $\Delta N = \delta N - 23 \text{ m}$ 来表示 (见图 3), 它随着纬度带的不同而变化, 分布在 $65^\circ - 90^\circ \text{S}$ 之间大地水准面升高, 且在南极附近为最大, 其值达 115m, 而

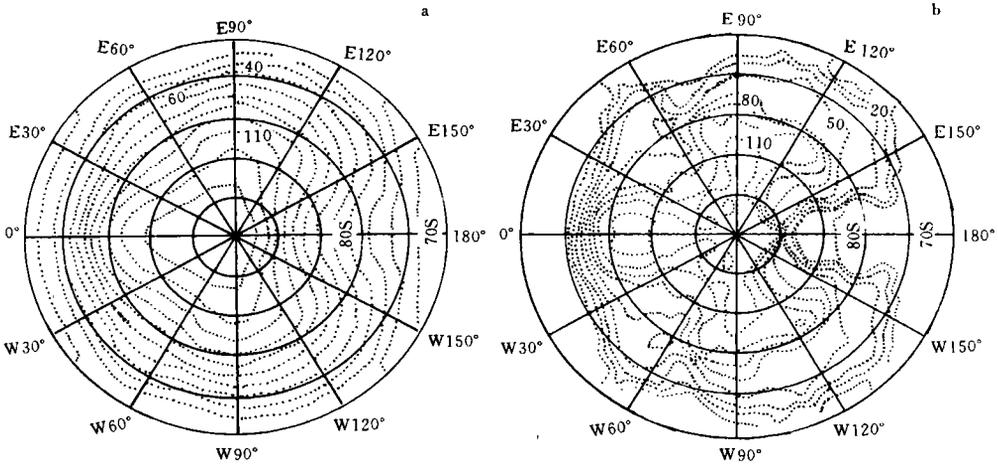


图 2 南极冰盖引起的大地水准面效应 (m) (a)和重力效应(10⁻³ m/s²) (b)

Fig.2 Effects of the Antarctic ice sheet mass on: (a) the geoid (in m); (b) the gravity (in 10⁻³ m/s²)

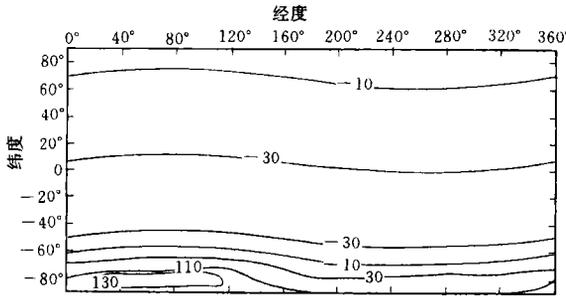


图 3 南极冰盖对大地水准面 (m) 的影响

Fig.3 Influence of the Antarctic ice sheet on the geoid undulation (m)
+为北纬; -为南纬

在其它纬度带上包括北极在内,大地水准面明显降低,且在南纬 25° 为最小,其值为 -37m,以上就是南极冰盖形成后全球大地水准面发生的变化。至于消融后的变化,全球将平均增加约为 23m。值得注意的是,在以上讨论中,都是将地球视为刚体,仅考虑地球上冰水循环时引力效应,而未考虑地幔脱气成水以及因构造原因而改变洋盆体积等的效应。

3 在均衡条件下冰盖消融后的相对海平面变化

设固体地壳呈弹性,其下是地幔呈不可压缩于流体状态,由均衡原理可知,在地幔的某一深度上的压强应处处相等。若是海洋表层上增加一层厚度为 Δd (m) 的海水,其密度为 ρ_w (kg / m³),负荷下的固体地壳厚度不变,由于它具有弹性,故发生挠曲下弯,这时软流层的地幔发生流动而向四周挤压,在均衡调整下其厚度将会减薄,实际上地球这种弹性和粘弹性质已明显地表现在固体地球的潮汐观测之中。

由于全球大尺度均衡调整,地幔体的厚度 ΔD (m) 将随覆盖其上的海水厚度 Δd (m) 而变化,此时 $\Delta D = \Delta d \rho_w / \rho_m$,将 $\Delta d = 65$ m(连同格林兰等冰盖消融在内), $\rho_w = 1\ 030$ kg / m³,地幔密度以不同的 ρ_m (kg / m³) 值代入,有:

$\rho_m = 3\ 270$	$\Delta D = 20.5$
$\rho_m = 3\ 370$	$\Delta D = 19.9$
$\rho_m = 3\ 470$	$\Delta D = 19.3$

在大洋地幔减薄过程中, 软流体进入大陆地壳之下可使大陆地壳抬升, 其抬升值为: ΔH ,

$\Delta H = 70 / 30 \Delta D$, $\Delta H, \Delta D$ 的单位为 m, $70 / 30$ 为大洋面积与大陆面积之比。

对于 $\rho_m = 3\ 270$ 有 $\Delta H = 47.8$

$\rho_m = 3\ 370$ $\Delta H = 46.4$

$\rho_m = 3\ 470$ $\Delta H = 45.0$

设相对海面的变化值为 Δh , 仍以 (m) 为单位, 这时, $\Delta h = 65 - (\Delta D + \Delta H)$

当 $\rho_m = 3\ 270$ 有 $\Delta h = 2.8$

$\rho_m = 3\ 370$ $\Delta h = 1.3$

$\rho_m = 3\ 470$ $\Delta h = -0.7$

从以上数值可知, 全球相对海面的变化是比较小的, 其变化与地幔的密度有关, 若地幔密度为 $3\ 270\text{kg} / \text{m}^3$, 则相对海面的上升仅为 2.8m。

4 结语

4.1 由全球物质转移而形成的南极冰盖, 对大地水准面的影响甚为显著, 在全球表现为两极大、中间小而在南极为最大, 用球函数方法计算比较方便, 计算结果也比较符合实际。

4.2 地壳基本上处于均衡平衡状态, 亦即海水的负荷可以通过地壳深度以下的物质补偿流动而达到均衡, 对于厚度为 65m 的海水加载于洋壳之后, 陆、洋之间相对海面变化仅为 2.8m, 然而地壳实现均衡调整的时间可能是相当长的, 因为实际的地幔具有粘弹性质。

4.3 南极冰盖的形成经过了漫长的历史时期, 因而估计它的消融也会经历很长时间, 地球在这种长期负荷力(卸载力)的作用下, 可以发生蠕变, 从而引起冰后回弹、大地水准面和相对海平面的变化, 近年来已有一些学者用严格的流变理论来研究此问题(张大仲, 1994), 只要对地球的粘弹性质以及冰盖形成(消融)的历史有比较全面的了解, 才会作出符合实际的研究, 可惜至今对此了解还相当不够。与此目标相比, 本文仅是对上述问题在理想地球的情况下的一个初步讨论, 这也是今后本项工作需待深入研究之处。

参 考 文 献

- 杜巴赫 H 泰伯 R, 1972. 贡光禹等译, 1979. 海洋. 北京: 海洋出版社. 115—116
- 张青松, 1988. 第三纪前的南极古地理与南极冰盖. 南极研究, 1(1): 1—12
- 张大仲, 1994. 地幔流变性性与冰后回升问题的研究. 见: 中国科学院测量与地球物理所编辑. 祝贺方俊院士九十寿辰论文集. 北京: 测绘出版社. 108—112
- Bretterbaner K, 1990. Selected works of international symposium in four dimensions geodesy. Stuttgart: Springer - Verlag. 100—109
- Kivioja L A, 1967. Effects of mass transfers between land - supported ice cape and oceans on the shape of earth and on the observed mean sea level I. Bull Geod, 79:283—288
- Seyawa J *et al*, 1980. Brief topography in Antarctic region. Tokyo: Publication of NAPR in Japan

IMPACTS OF THE FORMATION AND ABLATION OF ANTARCTIC ICE SHEETS ON THE GLOBAL GEOID AND SEA - LEVEL CHANGES

ZHANG Chi - jun, LU Yang

(Institute of Geodesy and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430077)

Abstract It is convenient to investigate into the gravimetry using a harmonic spheric function which describe the distribution and thickness of the Antarctic ice sheet. The gravitational theory and the Stokes' harmonic spheric function formula were used to determine the impact of the Antarctic ice cap on the global geoid. The Antarctic ice cap is formed from the condensation of seawater vapour whose mass is equal to a layer of seawater 59m thick of covering the earth's surface, i.e. 2.7×10^{19} kg. This will cause the global averaged geoid to decrease for around 23m. The authors' computations show that the Antractic ice cap has a great impact on the global geoid, which increases (+) in some regions, but decreases (-) in other regions. The geoid is +115m, -37m and +8m at the South Pole, the 25°S parallel and the North Pole, respectively. If the Antarctic ice cap melts completely, on the rigid Earth's surface the seawater and geoid will return to its original position (and height) due to the balancing force of the fluid.

Since the crust is almost in a state of isostasy, assuming that the crust is an elastic solid and the mantle is an incompressive fluid, the load of seawater will deflect the crust and drive the mantle material to flow. The material above the isostatic surface compensates mutually. If the densities of the mantle and seawater are 3270 kg/m^3 and 1230 kg/m^3 , respectively, then the variation in the elevation of the continent is only 2.8m with respect to the sea level after the Antarctic ice cap melts.

It is worth noting that the above results were derived from an ideal Earth model. In the real Earth, the mantle and crust are visco - elastic.

Key words Antarctic ice sheet Geoid undulation Relative change of sea level

Subject classification number P 731