物质平衡法在龙门山晚三叠世以来隆升、剥蚀和古高度估算中的应用

颜照坤[1,2)]，李勇[1,2)]，董顺利[3)]，张毅[1,2)]，赵国华[1,2)]，闫亮[1,2)]，
李奋生[1,2)]，李敬波[1,2)]，郑立龙[1,2)]

1）成都理工大学沉积地质研究院，成都，610059；

2）油气藏地质及开发工程国家重点实验室（成都理工大学），成都，610059；

3）中国科学院地质与地球物理研究所，北京，100029

山脉的隆升与剥蚀过程研究一直是地学界研究的热点和难点，而与造山带毗邻的沉积盆地则真实地记录了山脉的隆升、剥蚀历史（符超峰等，2005）。物质平衡法是一种再造古地形的定量研究方法，它是根据一定时间内，在一个封闭的剥蚀-沉积系统内，剥蚀总量与沉积总量存在物质守恒的关系，通过将沉积盆地内的物质重新“搬回”物源区的手段，进行古地形再造（Hay et al.,1989；Word，1990）。本次将以剥蚀-沉积体系中“物质平衡原理”为基本理论依据，根据对现今盆地中各沉积阶段的沉积物数量的估算，获得龙门山自晚三叠世以来各个阶段的剥蚀量、剥蚀厚度和剥蚀速率，并估算龙门山在各个阶段古高度。

根据“物质平衡”进行古地理再造的核心思想就是将碎屑沉积作用过程作为一个封闭系统（包括所有剥蚀区和沉积区），以目前的剥蚀区海拔高度为基础，逐步将盆地的沉积物质剥下来，重新搬回物源区，以恢复造山带不同时期的古地形高度，为再造物源区剥蚀通量和隆升过程提供依据（汪品先等，1993）。根据物质平衡法所需的条件，本次计算出的沉积通量、沉积速率和剥蚀速率均代表各个阶段的平均沉积通量、平均沉积速率和平均剥蚀速率；晚三叠世至今，由于整个剥蚀-沉积系统已经发生巨大的变化，物源区范围和沉积区范围已经无法精确确定，本文充分考虑剥蚀区与沉积区物源对比分析（主要是锆石年龄）、地层出露情况（主要依据基岩出露情况、下三叠统出露情况）、构造特征（基岩断裂分布）构造演化特征（由北向南推进表明物源区总体上北宽南窄）等因素，初步界定物源区边界进行；此外，通过对不同沉积阶段的地层特征作详细分析，初步确定来自西部物源区的地层分布范围。

根据钻井、地层剖面等资料，利用 Surfer8.0 软件编制出晚三叠世以来龙门山前陆盆地各阶段残留地层等厚图，并计算出晚三叠世以来各个阶段沉积地层的沉积总量，利用物质平衡法将各阶段沉积物回剥至物源区，计算各阶段龙门山的剥蚀量、剥蚀厚度和剥蚀速率（表 1）。

目前已知各个阶段的剥蚀厚度，如果能获得每个阶段的地壳隆升幅度或隆升速率，那么就可以完成对各个阶段古高度的恢复。然而，在地史时期的不同阶段，地壳隆升的速率是有差别的，如果使用平均的地壳隆升速率计算各个阶段构造抬升导致的隆升量，显然会造成较大的误差。那么如何对这些差别进行定量化？

通过对晚三叠世以来各个阶段构造活动强度的讨论，结合汶川 8.0 级地震强烈构造抬升并未造成山脉的生长，反而造成山脉体量的亏损的实例（Robert N. Parker, 2011），将晚三叠世以来的几个时期划分为两部分，分别为构造负载阶段和剥蚀卸载阶段，根据两种阶段的特征初步估算了晚三叠世以来各个阶段地壳隆升速率与剥蚀速率之间的线性关系，据此可以计算出各个时期的地壳隆升幅度，进而可以对龙门山晚三叠世以来各个阶段的古高度进行估算（表 1，图 2）。

结论

（1）晚三叠世以来，龙门山前陆盆地的西侧物源区的平均剥蚀厚度达到 7.05km，根据现今物源

Email: yzk517@163.com

区平均海拔 2.75km，可估算整个物源区的地壳平均隆升幅度达到 9.8km。因此地壳隆升的 9.8km 地层有 72%被后期剥蚀掉了。

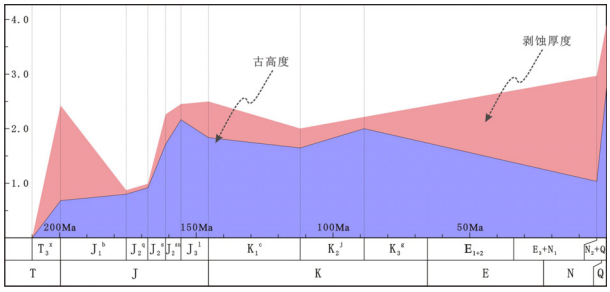

图 1 晚三叠世以来龙门山古高度与剥蚀厚度变化趋势图

（2）由于龙门山是隆升-剥蚀更强烈的边缘山脉，其剥蚀厚度必然远超过 7.05km，根据龙门山现今最大海拔约为 5km，可以估算龙门山的地壳最大隆升幅度可能超过 12km。根据龙门山的正均衡重力异常模拟反演的结果表明龙门山地区地壳隆升幅度达到 11.2~12.6km（李勇等，2006）。利用磷灰石裂变径迹法研究了龙门山地区的剥蚀作用，其结果表明龙门山至少有 5~6km 或 7~10km 的地层被剥蚀掉了（刘树根等，2003；Xu Ganqing 等，2000）。上述两种方面获得的结论与本文计算结果（龙门山地壳隆升幅度大于 10-12km，剥蚀厚度大于 7.05km）十分吻合。说明本文对龙门山与前陆盆地之间剥蚀-沉积系统的基本假定是合理的，通过这一方法进一步限定了龙门山自晚三叠世以来的隆升幅度和剥蚀厚度。

（3）龙门山自晚三叠形成山脉以来，由最初的 0m 演化到现在平局海拔 2.75km，根据对各个阶段龙门山古高度的估算，初步认为龙门山高度经历了两次较快的隆升，分别为 167.7 Ma~155.6Ma 和 3.6Ma~现今，并初步确定龙门山在侏罗纪遂宁期和白垩纪夹关期的山脉较高，平均海拔超过 2000m。

文由国家自然科学基金项目（编号：40972083,41172162,49803013,40372084,40841010）、国土资源部地质调查工作项目（编号：1212011121268）和油气藏地质及开发工程国家重点实验室自主研究课题（编号：SK-0801）资助。

参 考 文 献

符超峰, 方小敏, 宋友桂, 强小科, 常宏. 2005. 盆山沉积耦合原理在定量恢复造山带隆升剥蚀过程中的应用. 海洋地质与第四纪地质, 25(1) : 105-112.

李勇等. 2006. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应. 北京: 地质出版社.

刘树根,罗志立,赵锡奎等. 2003. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例.地质学报, ,77(2):177-186.

汪品先,刘传联. 1993. 含油气盆地古湖泊学研究方法. 北京: 海洋出版社, ,15~35.

Hay,W.W., Shaw, C. A. and Wold, C. N..Mass-balanced paleogeograghic reconstructions. Geologische Rundschau,1989,vol. 78:207-242.

Wold, C. N. and Hay, W. W. .Estimating ancient sediment flauxes. Am. Jour. Sci. , 1990, vol. 290: 1069-1089.

Xu G Q ,Peter J J Kamp.Tectonices and denudation adjacent to the Xianshuihe fault, eastern Tibetan Plateau: Constraints from fission track thermochronology. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B8):19231-19251.

Robert N. Parker, Alexander L. Densmore, Nicholas J. Rosser et al. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth[J]. nature geoscience, 2011,4:449-452.

表 1 晚三叠世以来龙门山的隆升、剥蚀及古高度估算

年代地层	岩石地层	剥蚀总体积/Gt	剥蚀厚度/m	时间/Ma	剥蚀速率/m/Ma	地壳隆升幅度/m	地表隆升幅度/m	古高度/m
N_2+Q	大邑砾岩、第四系	36674	1150	3.6	319.4	2875	1725	2751
K_2+E+N_1	灌口组、名山组、芦山组	62127	1948	85	22.9	974	-974	1026
K_1	夹关组	7225	227	23.4	9.7	566	340	2000
	城墙岩组	15182	344	33.5	10.3	172	-172	1660
J_3	莲花口组	28997	658	10.1	65.1	329	-329	1832
J_2	遂宁组	13037	296	5.6	52.8	739	444	2161
	沙溪庙组	23543	534	6.5	82.2	1335	801	1717
	千佛崖组	3694	84	7.9	10.6	210	126	916
J_1	白田坝组	3311	75	24	3.1	188	113	790
T_3	须家河组	76577	1737	10.4	167.1	2415	678	678