

人为物质流及其对城市地质环境的影响^{*}

罗 攀

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 人为物质流已成为引起地壳物质运动的一种重要地质营力, 深刻地改变着地球的表层系统。分析了人为物质流的含义, 并将人为物质流分为一次流、二次流和三次流, 讨论了不同层次的人为物质流的产生和流动方式。在此基础上, 进一步探讨了人为物质流对城市地质环境的影响, 分析了城市地质灾害如地面沉降、地裂缝、地面塌陷、斜坡地质灾害、诱发地震、海平面上升及海水入侵、地下水及岩土污染与人为物质流的关系, 并指出规模不断膨大的人为物质流已成为地球和人类社会潜在的灾难。

关键词: 人为物质流; 地质营力; 城市地质环境; 城市地质灾害

中图分类号: X141 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) 06-0120-05

人类活动的规模和强度不断提高, 并已成为推动地球系统变化的一种强迫力, 深刻地改变着地球的表层系统。人类活动对地球表层的改造集中体现为人为物质流。

1 人为物质流的形式与分类

所谓“人为物质流”, Neuman-Mahlkau^[1] 将其定义为“人工物质搬运”。作者认为将“人为物质流”理解为“非自然力导致的地壳表层物质运动”, 可能更为合适。人为物质流有在方式上多层次形成、在影响上层层推进的特点。

1.1 一次人为物质流

一次人为物质流是人工对地壳物质, 包括岩石、土壤、化石燃料(煤、石油、天然气)、地下水等的开采和直接搬运。据文献^[1], 全球范围人为物质流搬运的岩石物质总量 $35 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 大体与自然地质营力搬运的各种固体物质总量 $37 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 相当。

上述统计中地质成因的物质搬运包括冲蚀、造山运动、海底扩张形成新洋壳、河流中沉积流、火山喷发及陨石冲击带来的搬运; 而全球人工搬运的岩石总量 $35 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 则统计了各种化石燃料、矿产、建材的开采, 所有土石方的挖掘, 这一数据尚不包括全球 $550 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 的地下水开采量^[2]。

水库蓄水属于一次人为物质流, 水坝使得流向下游的水反向滞留水库。1999年, 全世界水库总库容达到 $2\,000 \text{ km}^3$, 约占全球总径流量的 16.7% ^[3], 已开始蓄水的三峡工程, 其库容达到 39.3 km^3 。水

库在带来防洪、发电等效益的同时, 其诱发地震、内涝、导致干旱区泉水和地下水补给衰竭、破坏生态景观等环境负效应也日益凸现。

一次人为物质流的流动量, 已可与自然地质营力的搬运量相比较。由于一次流对地球系统产生的影响, 主要集中在源区(生成区)和集散区, 它对局部地区地质环境的影响将远远超过自然地质营力。

1.2 二次人为物质流

二次人为物质流(简称二次流)定义为一次人为物质流基础之上的生产和消费所导致的物质流动。二次人为物质流伴随人类活动的全过程。大部分有型消费品的制造、使用, 可认为是二次流。二次流可分为物理流和化学流。

物理流指利用一次流的物质生产有型产品或商品流通、消费导致的物质流。经济活动中各种物资向城市等高度工业化地区的聚集、各种产品的制造消费废弃、人类的建筑活动、废物的堆积等均可认为是物理形式的二次人为物质流。

化学流是伴随二次物理流而产生的化学扩散。人类通过采矿和选冶, 使分散的元素集中起来, 生成各种金属非金属产品, 合成了许多化合物, 对这些产品的使用直至废弃, 元素又发生新的迁移, 从而改变了某些元素在地壳中的分布状况。总的看来, 化学形式的二次人为物质流更多表现为离散效应, 致使地球系统的总熵呈现出增大趋势。

1.3 三次人为物质流

三次人为物质流是指一次或二次流中产生的无

^{*} 收稿日期: 2002-12-14

基金项目: 高等院校博士点基金资助项目 (2001024411706)

作者简介: 罗攀 (1981年生), 男; E-mail: luopansir@yahoo.com.cn

定型物质流。例如，化石燃料的大量使用所排放的CO₂，导致全球CO₂浓度升高（图1）^[4]。

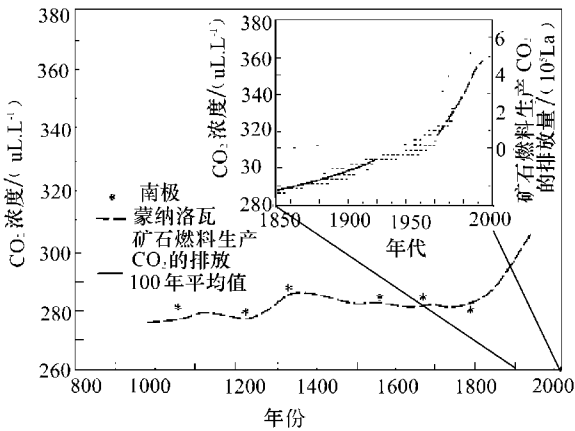


图1 过去1000年来冰核和大气CO₂浓度变化
Fig.1 The variation of CO₂ concentration in the ice core and atmosphere in the last 1000 years

含硫化石燃料的燃烧和二硫化物矿的开采冶炼，使硫从原来的还原环境进入氧化环境，形成大气污染物酸雾或硫酸盐气溶胶，并通过大气降水迁移至地表，导致环境酸化。酸雨已成为当今世界最严重的区域性环境问题之一。中国1995年SO₂的排放量已达2.370×10⁴ t，超过美国成为世界第一大SO₂排放国，同时也是遭受酸雨危害最严重的国家之一^[3]。此外，磷肥和含磷洗涤剂的使用导致“水华”、“赤潮”；工业废水废气、生活污水及滥施化肥农药等对环境造成污染，均可视为三次人为物质流的效应。

三次人为物质流极大的破坏了地球上存在的可持续发展的物质平衡机制，使得一些良性的循环转变为恶性。

综上所述，人为物质流形式复杂，规模巨大，一次、二次、三次物质流相互关联，层层推进，深刻地改变着地球的物理与化学平衡。在人类历史的时间尺度内，这种流动和改变是单向和不可逆的，其对环境的影响超过任何一种地质作用力，对环境造成的伤害制约着社会经济的可持续发展，甚至威胁人类的生存。人口的增长、经济的发展成为人为物质流的内在驱动，而科技的进步使得大规模、大范围的人为物质流成为可能。人为物质流规模的日益膨大成为一种必然的趋势。

2 人为物质流对城市地质环境的影响

城市地质环境是指城市地区生物圈、大气圈、水圈和岩石圈相互交汇而成的地质空间；它是一个

多因子系统，主要因子是岩石、土壤、地下水、生物、地质构造及其间的地质作用等，其上限是地表，下限是人类工程活动深入地壳的深度^[9]。现代城市的特点是人口、工业、建筑的高度和资源的高效利用，是人类活动最强烈最多样化的区域，因而是人为物质流最为庞大的集散区域。城市化的过程伴随着规模巨大的人为物质流的形成和集散，改变了原有的地质环境。

城市建设和发展依赖于地质环境，并且无一不将地质环境作为工程结构的地基甚至结构的一部分，城市发展因此受到地质环境制约；另一方面，城市建设和发展又不断改造地质环境，当人为物质流的规模（人类活动的强度）超过地质环境容量时，地质环境自然平衡就会破坏，环境质量恶化，甚至诱发地质灾害^[6]。

3 人为物质流与城市地质灾害的关系

地质环境在地球内外力约束的条件下处在稳态平衡的运动过程，即平衡—不平衡—新平衡。作为一种重要的地质营力，人为物质流使得地质应力场、地下水动力场、表生地球化学场等发生不断的变化。这些变化深刻的影响着城市的地质环境，甚至引发地质灾害。图2给出了各种人为物质流与主要的城市地质灾害的关系。

3.1 地面变形地质灾害

地面变形地质灾害主要是指地面沉降、地裂缝、地面塌陷，它已成为城市地区面临的主要环境地质问题，人为物质流往往是其发生或加剧的重要因素。

3.1.1 地面沉降 地面沉降是地下支撑物的移动导致的地面标高损失^[7]。地下支撑物主要是指地下岩土体、孔隙承压水和石油天然气。一次流使得地下水、地下油气、地下岩土等支撑物流失，导致土层压缩或缺失，引起地面沉降。二次流产生局部静荷超载，如高层建筑、废物堆积，使松散的地下支撑物压实，也是造成或加剧地面沉降的原因之一。

地面沉降主要发生于平原和内陆盆地工业发达的城市以及油气田天开采区。表1列举了世界部分城市地面沉降的情况。

可见，人为物质流导致了城市地面沉降，并且物流量与沉降量存在线性相关的关系。即使是构造沉降占较大比重的西安市，量化分析表明在沉降中心部位，构造重力扩展引起的沉降量只占总沉降量的10%~15.5%，而人为物质流（抽水）导致沉降占85%以上^[12]。

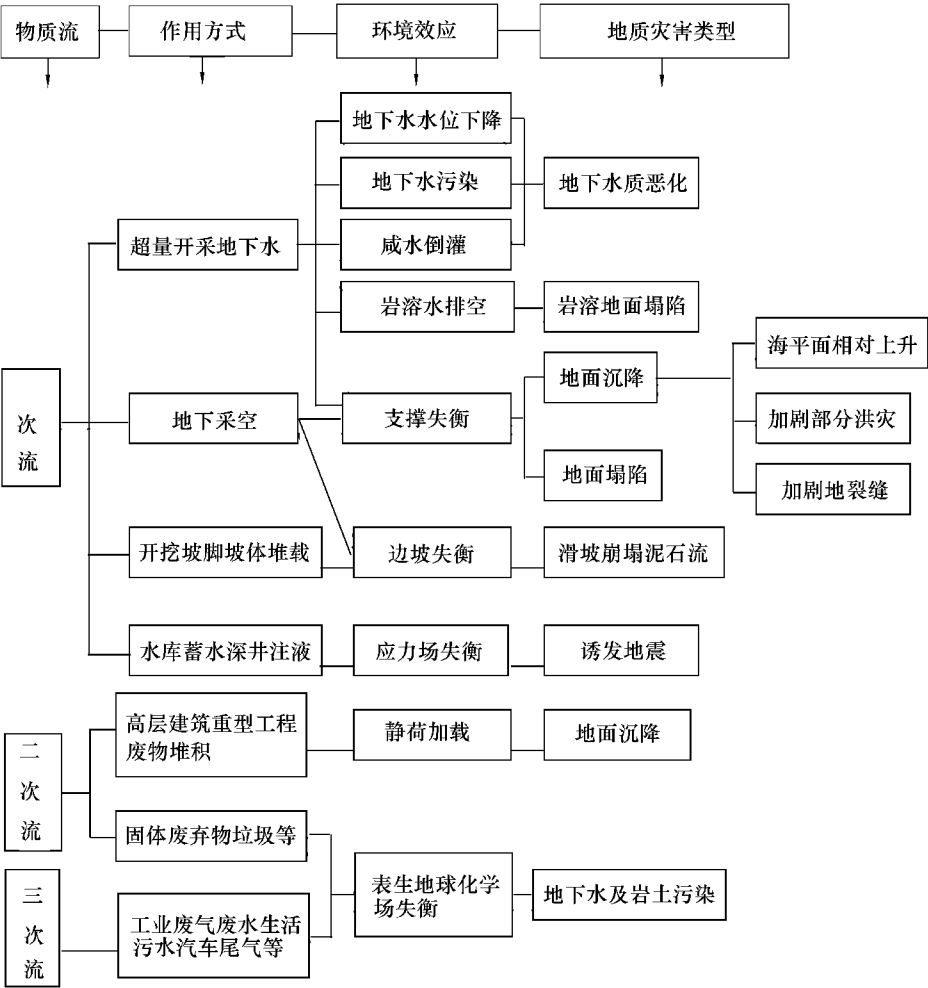


图 2 人为物流与城市地质灾害

Fig. 2 The flow chart for Anthropogenic material flow and urban geological disasters

表 1 世界部分城市地面沉降情况统计表

Tab 1 The statistics of land subsidence in some cities

城 市	沉降面积 km ²	最大沉降速率 (cm° a ⁻¹)	最大沉降量 m	发生沉降的 主要时间	主要致因
东京	1000	19.5	4.60	1892—1986	超采地下水
大阪	1635	16.3	2.80	1925—1968	超采地下水
加州圣华金流域	9000	46.0	8.55	1935—1968	
洛斯贝诺斯—开脱尔曼市	2330	40.0	4.88	?—1955	
加州长滩市	32	71.0	9.00	1926—1968	开采石油
亚利桑那州凤凰城	310		3.00	1952—1970	
墨西哥城	7560	42.0	7.50	1890—1957	超采地下水
上海		10.1	2.667	1921—1987	超采地下水
天津	8000	21.6	3.01	1959—1983	超采地下水
西安	250	12.7	1.70	1960	抽水沉降

(据张倬元等, 1994, 增补改编)

在诸多实例中, 过量抽取地下水引起的地面沉降最为普遍。这可依据 Teraaghi 一维粘土固结理论^[8]加以解释。地面沉降与地下物质流 (主要是地下水) 的物流量有着密切的成因联系:

(1) 地面沉降中心与地下水开采漏斗中心区呈

明显一致性^[9];

(2) 地面沉降量等值线展布方向与地下水开采漏斗等值线展布方向基本一致^[9];

(3) 地面沉降量与地下流体开采量, 沉降速率与开采速率有良好的对应关系。这可以从上海^[10]

和西安^[11]的情况加以验证。

(4) 通过人工回灌和限制地下水开采来恢复和抬高地下水位, 可控制地面沉降的发展。

3.1.2 地裂缝 中国地裂缝主要是沿活断层分布的断层蠕滑型构造地裂缝^[13], 构造运动是其形成的前提条件, 决定地裂缝活动的性质和展布特征, 而人为物质流 (超量抽水、采矿、灌溉水渗入等) 是诱发因素, 影响地裂缝发生的时间、地段和发育程度。

以西安为例, 大致沿 NE70°~80°发育有 11 条地裂缝, 总长约 65 km, 其活动量的 80%~90%与超采地下水有关。由于在断层两侧的渗透性不同, 地下水超采引起的降深也不同, 断层两侧不同的地面沉降, 形成了沿第四纪断层发展方向的地裂缝^[11]。

3.1.3 地面塌陷 地面塌陷主要有两类: 矿区地面塌陷和岩溶地面塌陷。

矿区地面塌陷是一次人为物质流地下采空造成的。全球每年从地下开采的各种矿石 (包括煤、石油) 约 5×10^{10} t, 再加上开采过程中运到地面的各种矸石、废料, 数量非常巨大。地下开采造成普遍的地面变形, 重则地面塌陷。初步统计, 中国因采矿引起的地面塌陷面积达 1 150 kg², 发生采矿塌陷灾害的城市近 40 个, 造成严重破坏的 25 个。山西大同、河北开滦、河南平顶山、辽宁本溪受灾严重^[9]。

岩溶地面塌陷主要分布于岩溶强烈到中等的覆盖型碳酸盐地区。秦皇岛、唐山、桂林、武汉、贵阳、昆明、遵义等城市尤为严重。对岩溶地面塌陷成因机制主要有两种认识, 即地下水潜蚀机制和真空吸蚀机制, 但无论基于哪种认识, 一次流地下抽水、疏干排水往往是其重要诱因。

3.2 斜坡地质灾害

重力是斜坡地质灾害的内在动力, 强烈的地形切割、适应的地质构造、地层岩性、岩土结构及地下水作用等条件是影响坡体失稳的主要自然因素, 而暴雨或连续降雨起着重要的诱发作用。对于城市滑坡、崩塌及泥石流, 人为物质流是坡体失稳的重要诱因。

斜坡地质灾害多见于山区城市。山区城市建设, 带来人工切坡、弃土加载, 这是一次流; 而排水不当、污水渗漏则使得岩土体含水量增加, 抗剪强度降低, 从而导致坡体失稳, 这正是一次流与二次流相叠加的负效应。

3.3 诱发地震

水库蓄水和深井注水、采油采矿等均可诱发地

震。诱发地震是人类工程活动产生的人为物质流引发的地质灾害。水库蓄水人为使得流向下游的水滞留水库, 深井注水和采油采矿亦是典型的人为物质流。20 世纪 50 年代开始, 伴随水利资源的开发全球大中型水库急剧增加, 进入 60 年代, 水库地震的频度和强度开始达到高峰, 中国新丰江、非洲卡里巴、希腊科列马斯塔、印度科依纳相继发生了 6 级以上水库诱发地震。

3.4 海平面上升及海水入侵

联合国《1995 年全球气候变化科学评估报告》指出: “温室气体”增加, 全球气温自上世纪末以来已增加 0.3~0.6℃, 由于冰川融化和海水受热膨胀, 全球海平面已上升 10~25 cm。IPCC 1990 年模拟结果, 到 2100 年全球海平面上升估计值最高为 110 cm, 最低为 31 cm, 最佳值为 66 cm^[4]。

以上数据是对全球绝对海平面而言, 未考虑地区差异。更具实际意义的是考虑陆面与海面的变化, 即进行相对海平面研究。上海、天津等城市, 由于抽水所致的地面沉降, 最大累计量已达 260 cm 以上, 成为评估相对海平面上升的主导因素。天津市如果地面沉降率控制在 6 mm/a, 预计到 2050 年相对海平面上升 50~60 cm, 若控制在 10 mm/a, 那么 2050 年幅度可能达到 80~90 cm^[4]。

海平面变化的影响因素十分复杂, 但上述分析说明了两点: 一次和二次人为物质流所引起的地面沉降是相对海平面上升的重要因素; 而化石燃料的大量使用导致大气中的 CO₂ 浓度升高 (三次流), 从而引发温室效应, 这是短期内绝对海平面上升主要原因。

海水入侵主要是由于沿海地区过度开采地下淡水资源, 形成低于海平面的地下水位负值区, 海水沿含水层侵入地下淡水层。我国大连、秦皇岛、莱州、北海、美国长岛、墨西哥赫莫斯城以及日本、荷兰等国家滨海城市都存在海水入侵问题。

3.5 城市地下水及岩土污染

地下水污染与岩土污染紧密联系。岩土和水溶液处于同一地下水系统中, 地下水中的污染微粒与岩石吸附微粒总是处于一种动态平衡。

二次和三次人为物质流带来的工业“三废”、生活污水、固体废弃物等是城市地下水及岩土污染的污染源。重金属、有机污染物、酸碱污染物等通过包气带渗入或直接进入地下水系统, 造成污染。

同时, 一次流, 即超量开采地下水是地下水污染的重要原因。地下水漏斗的形成加速了污染物的入渗; 地下水位下降使包气带加厚, 还原环境转变为氧化环境, 一些金属不溶物被氧化成游离的金属

离子, 淋滤渗入地下水层; 滨海城市地下水超采引发海水入侵, 导致地下水硬度升高, 水质恶化。

二次和三次人为物质流带来的地球化学污染已非常严重。重金属污染、白色污染、环境酸化、水体富营养化、二恶英、“化学定时炸弹”等等。这些在自然的物质循环中几乎不可能产生。目前全世界每年生产的合成化学品已超过 1 亿 t; 我国每年污水排放量达 584 亿 m^3 , 其中 80% 未经任何处理直接排入江河湖海; 我国工业固体废物和城市生活垃圾大都集中在城郊及河流漫滩上, 累计堆储量达 67.5 亿 t, 占地 5.6 hm^2 , 成为严重的二次污染源, 这些数据已反映出人为物质流具备了改变表生地球化学环境的能力, 而这种改变常常是负面的, 将严重破坏生态环境, 并直接危害人体健康。

4 结 论

人为物质流在推动社会进步的同时, 产生了破坏人类生存系统的负面效应。城市是人为物质流的集散地和消耗区。人为物质流在城市地区的负面效应是破坏城市地质环境, 诱发一系列的地质灾害。

人口的增长和经济的发展将使得人为物质流的规模日益膨大, 其负面效应也会越来越严重, 必须对此有足够的重视, 同时研究有效的监测和控制手段, 才有可能使其不会成为地球和人类社会的巨大灾难。

致谢: 本项研究得到中山大学地球科学系陈国能教授、丘志力副教授的悉心指导, 在此致以诚挚的感谢。

参考文献:

[1] NEUMANN MAHLKAU P. Anthropogenic material flow——a geologic factor // 第 30 届国际地质大会论文集(第 2 卷): 地学与人类生存、环境、自然灾害[C]. 北京: 地

质出版社, 1999: 63—67.

- [2] 王玉平, 金晓娟. 中国地下水资源开发与环境保护研究[J]. 地球学报, 1999, 20(增刊): 868—876.
- [3] 钱易, 唐炎. 环境保护与可持续发展[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 8, 60.
- [4] 陈梦熊. 关于海平面上升及其环境效应[J]. 地学前缘, 1996, 3(1—2): 133—140.
- [5] 雷祥义. 协调人与地质环境的关系(I) 人类活动对地质环境的影响[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2000, 30(4): 323—327.
- [6] 王思敬. 中国城市发展中的地质环境问题[J]. 第四纪研究, 1996(2): 115—122.
- [7] BERTOLDI G L. Where do we go from here. a new initiative for subsidence research in the United States[A]. Hyatt Regency, Sacramento, California: AEG. GRA 1995 Annual Meeting[Z]. 1995: 35.
- [8] TERZAGI K. Principles of soil mechanics (IV): Settlement and consolidation of clay[J]. Eng News-Rec, 1925: 874—878.
- [9] 潘懋, 李铁峰. 灾害地质学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [10] 陈梦熊. 关于海平面上升与控制地面沉降 // 中国水文地质环境地质问题研究[D]. 北京: 地震出版社, 1998: 62—70.
- [11] Momikura Yoshimasa, Sun Yao, Sato Eiichi. 西安的城市地质——对地裂缝的分析 // 第 30 届国际地质大会论文集(第 2 卷): 地学与人类生存、环境、自然灾害[D]. 北京: 地质出版社, 1999: 162—168.
- [12] 王兰生, 徐进, 赵其华, 等. 地裂缝、地面沉降及其环境地质效应 // 第 30 届国际地质大会论文集(第 2 卷): 地学与人类生存、环境、自然灾害[D]. 北京: 地质出版社, 1999: 151—161.
- [13] 王景明, 王春梅, 刘科. 地裂缝及其灾害研究的新进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 303—313.

Anthropogenic Material Flow and Its Effects on Urban Geological Environment

LUO Pan

(Department of Earth Sciences, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Anthropogenic material flow has become an important geological agent, which resulted in movements of the crust material and profoundly affected the earth surface system. In this paper, the anthropogenic material flow is classified into three categories according to the origins and flowage modes. Based on the classification, the influence of anthropogenic material flow on the urban geological disasters is analyzed, such as land subsidence, ground fissure, land collapse, slope disasters, induced earthquake, sea level rise, salt water intrusion, ground water and rock soil pollution. The results show that the enlargement of anthropogenic material flow has become the potential disasters for the humanbeing.

Key words: anthropogenic material flow; geological agents; urban geological environment; urban geological disasters