

水—岩土化学作用的环境效应*

汤连生

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 对水—岩土化学作用的环境效应从几个方面进行了实例分析. 针对水—岩土化学作用所存在的正负两方面的环境效应, 强调指出, 在重视研究其负效应的同时, 还应更多地通过分析水—岩土化学作用的过程, 综合利用地质环境中水—岩土化学作用的规律来达到调控和防治环境地质灾害的目的. 分析了水—岩土化学作用环境效应的研究思路及研究方法, 并认为这是环境地质研究中值得开拓的新领域.

关键词: 水—岩土化学作用; 环境效应; 环境地质灾害; 调控; 防治

中图分类号: P642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 05-0103-05

环境地质及地质灾害研究中, 以往尤其重视力学方面的研究或仅化学污染单方面的研究, 而对水—岩土化学作用的环境效应的研究重视不够. 例如, 在人类工程建设中, 一般以当时原状岩土体的承载极限强度进行设计, 而较少考虑岩土开挖以后引起的水—岩土化学作用或强腐蚀性的废水的化学作用所导致的力学效应, 于是就可能酿成灾害. 这主要是因为: 岩土开挖, 造成新的岩面、新的裂纹和破裂面的形成, 使得雨水、地下水及废水更易渗入、渗透于岩土中, 从而加剧水—岩土化学作用. 随着岩土中水化学作用的进行, 岩土的力学性质也发生改变, 破坏了原岩土体的微结构及成分, 降低了岩土的承载能力. 渗入水一般都对岩土都具有新的侵蚀性, 或导致岩石的临界应力强度因子下降及宏观力学性质的恶化, 或导致土体的压缩系数提高, 抗压、抗剪强度降低.

水—岩土化学作用的危害, 不仅来源于它导致的岩土力学性质整体上的恶化, 而且更主要的来源于它对岩土体的不均匀破坏. 由于岩土体各处弱面发育不均匀, 受人类工程活动的影响也不一样, 所接触的水溶液的化学性质可能不相同, 由此导致岩土体各处的水—岩土化学作用的类型及强度差异很大. 弱面越发育的地方, 化学作用越强烈, 破坏程度越高; 反之亦然. 不均匀的水化学作用的破坏, 甚至造成岩土中出现扭转力或偏心力, 这种化学损伤^[1]的力学效应比岩土整体性质的劣化更厉害.

1 水—岩土化学作用环境效应的诱发原因及实例分析

1.1 工业废水

石油、化纤、塑料、制革、造纸及印染等轻工业生产厂区周围岩土体都已有程度不同的水化学损伤造成的环境地质问题, 主要是由于岩土体中渗入了大量的酸性或碱性废水. 一般情况下, 地下水的酸碱度为 3% ~ 7%, pH = 6 ~ 7, 而在这些生产厂建厂数年后的某些车间附近常发现酸碱度达 20%, pH 为 3 左右的地下水, 导致地基土变得疏松多孔、变黑、变软, 构筑物基础下面局部地区出现空穴, 于是出现不均匀沉降, 地坪开裂, 结构开裂、倾斜、下陷等.

例如, 某厂酸库因硫酸渗入土中产生强烈化学作用, 使墙基附近的土变成稀泥浆; 某造纸厂也因强碱渗漏使地基土受侵蚀产生不均匀变形而引起喷射炉体倾斜; 上海某合成洗涤剂厂的喷粉车间由于所使用的有机溶剂大量渗入地下, 将基础沥青碎石垫层中的沥青溶解并随地下水流失, 下渗酸碱废液使混凝土及地基土受到腐蚀, 导致厂房的地坪、墙、柱出现开裂, 设备管道严重断裂渗漏; 某厂硫铵工段, 由于大量硫酸、硫酸铵溶液等生产污水渗入地基, 局部地区地基土被酸溶液侵蚀, 造成侵蚀与未侵蚀两侧的差异沉降, 导致厂房墙体及地坪开裂, 屋面板拉裂, 行车轨道扭曲; 铁路成渝线路堑, 由于列车振动及地下水汇集造成的水—岩土的相互作用, 使基床岩土

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59779019, 59809008); 广东省自然科学基金资助项目 (970127)

收稿日期: 2000-12-21; 作者简介: 汤连生 (1963-), 男, 博士, 副教授.

的物理化学风化加快, 土质变差, 导致基床翻浆冒泥及下沉等基床病害. 当前, 由于工业污染的气体、水排放而造成的酸雨, 对用岩石材料建造的石造物(艺术品、纪念碑和雕像等)的腐蚀分解已相当严重, 如埃及、意大利、俄罗斯及中国等国的许多历史文物、古迹、艺术珍品都受到了极大破坏.

1.2 人类工程活动与暴雨

水库诱发地震、滑坡是人类工程活动^[2]与水一岩土化学作用的综合体现. 其中水库诱发地震, 目前全世界已有 100 多例, 我国已发生 16 例, 均分布在我国东部. 长江库区两岸由于水位的变幅较大, 引起水一岩土的化学作用的周期变化, 最终导致地质灾害的频繁发生. 愈来愈多的人类活动导致植被的破坏、岩土开挖等, 使得长江沿岸滑坡、崩塌等地质灾害的发生急剧增多. 根据地矿部 909 水文地质工程地质大队 1985 ~ 1988 年调查表明, 宝成线上由人类工程活动导致或激发的崩塌共 397 处, 这其中暴雨起的作用很大.

人类工程活动开挖的碎岩石碴堆于斜坡之上, 不仅增加了斜坡的上覆荷载, 而且改变并加强了降水的渗透, 改变了渗透水的化学成分及其与岩土的化学作用, 造成这些地区岩土体不稳定问题发生的频率加大.

人类工程活动对环境主要有以下 3 方面的作用^[2], 其中水一岩土化学作用对环境效应的作用也各有其特点: ① 岩土开挖. 引起岩土损伤、新弱面的出现, 并改变渗流场中地下水的源、汇的分布与强度, 从而改变局部地下水流动系统, 导致水一岩土化学作用模式的变化; ② 水流、水体调节. 在人类活动扰动下, 地表及地下水系统受到的影响表现为水位、渗流方向、梯度、速度的变化, 从而引起水一岩土化学作用的变化; ③ 工程热力作用. 由于在工程和岩土界面上的热传播, 可导致岩土介质中温度变化, 引起水一岩土化学作用的改变. 人类工程活动由于上述 3 方面的作用使岩土化学损伤加剧, 所导致的岩土力学性质变化反过来又会改变水一岩土的化学作用, 这是一种耦合作用.

岩土的渗透性和水溶液在岩土中的渗透速率对水一岩土化学作用的模式和强度起控制作用. 环境渗流场的改变(如暴雨作用使岩土体中地下水水头差发生改变), 将改变水一岩土化学作用

的模式及强度, 由此导致水一岩反应的力学效应的变化.

因此, 当自然界的地下水流动系统受到人类工程活动及暴雨的剧烈作用, 地下水与岩土体化学场原有的动态平衡就遭到破坏, 使局部的近饱和水溶液变成不饱和或极不饱和水溶液. 暴雨导致渗流场的剧烈变化, 尤其是渗流速率增大, 这样不仅改变了水一岩土化学作用的模式, 而且改变了其溶解—沉淀方向, 加剧了水一岩土反应, 使岩石产生新的水化学损伤, 导致岩土(体)的强度剧减. 在自然界中, 这种长期的水一岩反应模式的交替变化, 从整体上加剧了岩土的化学损伤. 这也正是在暴雨时地质灾害(如滑坡)频繁发生的原因, 而且, 暴雨诱发地质灾害时一般总是与人类工程活动牵涉在一起. 或者说, 人类工程活动的扰动为暴雨时带来地质灾害提供了渗流场和介质场的充要条件.

1.3 地质条件

地质条件对水一岩土化学作用及其环境效应起决定性作用. 例如, 构造断裂薄弱带是水一岩土化学作用的活跃地带. 又例如, 在软弱地层与坚硬地层相间(如灰岩、砂岩与页岩及煤系地层的)组合结构地质条件下, 当此类岩土的地形地貌差异性大时, 则在坚硬地层(如砂岩和灰岩)中易发育陡倾的构造节理, 这些都有利于大气降水的入渗, 而其下伏常有阻水之泥岩或页岩、煤系地层, 在地下水浸渍、崩解、软化等物理化学作用下, 极易于在此部位形成滑动面. 此过程中存在严重的水一岩化学差异腐蚀作用, 再加上经与软弱地层(如泥岩、页岩和煤系地层)水一岩土化学作用改造了地下水, 加强了坚硬岩层(如灰岩和砂岩)与地下水的化学作用, 使岩土力学性质的差异性或非均匀性进一步扩大, 使其强度降低. 在四川盆地, 尤其是长江沿岸的地质条件就属上述情况, 所以, 滑坡、崩塌、滑塌和泥石流等地质灾害在该地区普遍存在.

总体来说, 在微观上的位错、晶内缺陷、晶粒间的微孔或裂纹等及在细观上的节理、劈理、缝合线、裂隙和矿物成分、胶结物性质等对水一岩土的化学作用起决定性作用. 在宏观上, 水一岩土化学作用受制于地质条件(如地层岩土性质及结构、裂隙、断层、地形地貌及水文地质条件等). 在巨观上, 水一岩土化学作用的力学与环境效应, 还要考虑地质环境特征——水文地质及

自然灾害的分区性的制约。

2 水—岩土化学作用环境效应调控与地质灾害防治

2.1 水—岩土化学作用环境效应的调控

水—岩土化学作用的力学效应，根据它导致岩土力学性质的提高或降低，可分为正的力学效应和负的力学效应。而其环境效应，根据它使环境是否有利于人类的生活、生存或生产建设，也存在正负效应：不利于人类社会的环境变化称为环境的负效应；反之则为环境的优化，或环境的正效应。正负两方面的环境效应亦可称为双向效应。例如，在碳酸盐岩区的古崩滑堆积体中，富含 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 离子的地下水流经古崩滑体，当地下水径流缓慢时，沿途形成方解石沉淀和钙质胶结，提高古崩滑体的稳定性。这种现象就是水—岩土化学作用的正的环境效应。但该环境效应是不稳定的，此后若地下水流动系统发生变化，其环境效应就可能转变为负的。根据人类的意愿，水—岩土化学作用的负力学效应也可导致环境的正效应。因此，可以利用水—岩土化学作用的正负力学效应来治理地质环境灾害。

2.2 地质灾害防治新思路

在地质灾害治理方面，过去多采用桩、排、支、挡、护、砌、锚等物理力学措施，以改善坡体内部应力条件或提高岩土体强度^[3]。其实，我们应该更多地通过分析水—岩土化学作用的过程，综合利用地质环境中水—岩土相互作用的规律来达到预防、控制和治理地质灾害^[4]。如在已有的滑坡预报和地质灾害监测布置及研究等方面，今后就应该更多的采用此思路。下面将遵循此思路，进一步探讨通过调整地下水流动系统来改变水—岩土化学作用及利用水—岩土化学作用来改良土质及岩体力学性质的想法。此方面仍是一个值得开拓的新研究领域。

(1) 调控地下水流动系统，改良水—岩土化学作用，以达到预防及治理地质灾害。

地下水流动系统理论把赋存地下水的介质场、驱动地下水流动的水势场、温度场及化学场视为统一的有机整体，进而研究地下水流动系统的变化特征。岩土介质中的地下水流动系统是极为复杂的、多变的：我们可以运用地下水流动系统理论及水—岩土化学作用的力学效应或环境效应的特征，通过人为能动地调整、控制岩土中渗

流场的“源”“汇”的分布与强度，或通过地质岩土介质渗透性能的处理（如在裂隙发育的部位注水泥砂浆止水），可以改变局部地下水流动系统，并调控地下水的化学成分及性质，改良水—岩土化学作用，使地下水流动系统及其水—岩土化学作用向有利于地质环境保护的方向变化，以达到预防及（辅助）治理地质灾害的目的。

(2) 土质的改良。

化学被应用于岩土工程的例子是相当普遍的，也是工程界最为熟悉的，例如，各种化学灌浆的地基处理技术。但是，在自然大范围的地质环境问题或灾害中，如何通过调控水—岩土化学作用以改良土质，达到预防或（辅助）治理地质环境问题，是一个新课题。

例如，土中 Na^+ 相对含量较高，是促成土体分散性的内在原因。基于此分析，可以在土中增加二价阳离子的含量改变土体的分散性。目前，通用的方法是，在土中掺入氧化钙或轻氧化钙。实践证明，这种方法对改良分散土具有显著的效果^[5]。从机理出发，土中掺入一定数量氧化钙后，使得土中一价离子的相对含量减少，从而改变土体的分散性。此外，氧化钙有一定的胶结作用，也提高了土的抗分散性。化学分析的理论研究表明：一价离子比二价离子更容易被溶滤，经过溶滤，土中钠离子的相对含量呈下降趋势。因而在长期渗水作用下，由于离子的溶滤，可通过这种离子的交换来进行土质的改良。

由此可见，通过水—土的化学作用是有可能改良土质的。对于不同的性质的土，应掺入何种离子成分的水溶液或加强何种类型的水—土化学作用，也是一个新课题。

(3) 岩体力学性质的改良。

岩体的工程地质性质，主要取决于弱面的物理力学性质，其次才是岩块的性质。前面的试验已表明，岩体的应力强度因子受水化学作用的影响，因此，可以利用水—岩化学作用，来改变岩石弱面的变形与强度性质，以提高岩体的整体强度。例如，文献[1]的试验已证实，绿色花岗岩经过水溶液浸泡后，其应力强度因子 KIC 值就得到了提高^[6]。在实际中，可详细分析岩石及弱面的化学成分，找到致使岩石变脆的因素或导致岩石断裂强度提高的水溶液成分，然后配制或通过人工改造地下水化学性质以获得预期能改良岩石强度的水—岩化学作用，从而提高岩体的力学

性质.

3 水—岩土化学作用环境效应的研究思路与方法

3.1 研究思路

不同类型的地质灾害,其形成机理很不相同,但在许多岩土不稳定性地质灾害中,水的化学作用可看作地质灾害的一个主要的劣化因素,此方面的研究对地质环境的合理利用与保护有巨大意义.因此,对于环境地质灾害防治,在分析物理力学的时候,还要重视水—岩土的化学作用

的研究.

自然界中,水—岩土的化学作用是一基本地球化学作用,它的发生以溶液(包括热液)或地下水和岩石之间的化学或同位素的不平衡为前提,它是开放体系中的一种非平衡的地球化学过程.水—岩土化学作用系统作为开放系统,具有一定的演化条件和历程,并处于一定的演化阶段,是一个动态的系统,它对岩土的力学效应也是动态的(图1).因此,在环境地质灾害防治的研究中,要重视动态的水—岩土化学作用及人类工程活动的改造.

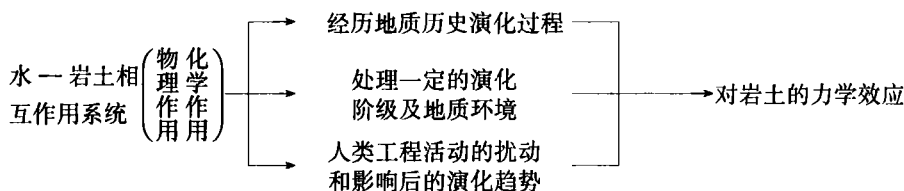


图1 水—岩土相互作用对岩体的力学效应

Fig.1 Mechanics effects of the reaction of water-rock and soil

人类工程活动对地质环境的扰动,引起地质环境各要素及总体环境发生变化^[2],从而引起地下水流动系统(包括介质场、水势场、化学场、温度场)的变化,于是,水—岩相互作用系统的改变,最终导致岩体的力学性质的变化.例如,地球化学风化作用中,一些原生矿物风化的最终产物是三水铝石,但是,当渗透、化学条件不同,它们的中间产物是不同的,如图2.而另一些原生矿物,由于水化学环境不一样,其风化的最终产物也不一样.

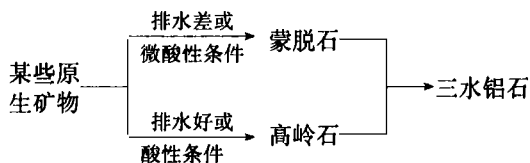


图2 原生矿物在不同条件下的风化过程

Fig.2 Weathering process of primary mineral under different conditions

岩土变形破坏涉及结构破坏之间不同尺度的相互作用,它涉及应力场、温度场和由岩土性质、水溶液成分所决定的化学场之间及其不同尺度的多重耦合和相互作用.这种不同尺度之间的多重耦合和相互作用是复杂的,也是一种非线性动态过程.其中将构成多个自组织反馈子系统.水化学作用对岩石(体)和土(体)的力学效应

主要在于,它导致岩土的原有微观结构的破坏,最终导致地质灾害的发生.

我们认为,全面运用物理、力学、化学的观点解释岩土的物理力学性质,通过水与岩土的化学反应达到调整岩土的物理力学性质,以改良岩土性或加固岩土体,达到防治环境地质灾害的目的.这种环保思路及环保思想,是今后地质环境研究的主要思路,也是有关地质环境问题或地质灾害的机理及其防治或改良研究的发展方向.

在此研究思路中,要以地质演化 and 人类工程活动影响的观念,加强水—岩土相互作用(包括物理的和化学的)系统的动态研究.对于地质灾害形成机理及其防治与水—岩土相互作用过程之间的关系的研究,我们要同时看到水—岩土相互作用系统的演化历史过程、现处的演化阶段及其演化趋势三者对岩土力学效应的贡献.因此,我们特别重视以下几方面的研究:(1)人类活动对地质环境扰动前后的水—岩土相互作用;(2)地下水流动系统的调控及环境保护;(3)水—岩土化学作用及环境效应的长期性监测;(4)重视水—岩土化学作用的微观试验研究与地质灾害的宏观环境分析的相结合及其定量关系方面的研究;(5)地质环境因素的充分、合理的综合利用.

3.2 研究方法

根据上述的研究思路,水—岩土化学作用环

境效应的研究方法应是，实验的方法、历史演化分析法、工程地质地球化学方法、定量分析与模拟法及类比方法。实验数据为我们提供了这样一种思路：定量模拟水溶液对岩土的作用，使观测岩土力学性质成为可能，可以通过岩土的微观观测，如通过镜下薄片观察、扫描电镜、电子探针或X光衍射等了解岩土矿物表面及内部的成分、结构的变化，找出岩土的力学性质与水—岩土化学作用的内在联系，推出岩土宏观力学性质改变的原因，甚至给出定量分析的模式。鉴于问题的复杂性，定性定量相结合的分析方法，必将促进该领域应用研究的发展。

在实际应用中，要在水—岩土化学作用的力学效应试验基础上，重视地质及水文地质历史演化分析法，定量模拟水—岩土相互作用中的重要化学过程，恢复或追溯实际中的水—岩土化学作用的演化历程，并预测人类工程活动后或自然地质条件变化后的演化趋势。这是水—岩土化学作用力学效应及环境效应的应用研究的主要方法。

水—岩土化学作用对岩土的环境效应，诸如对边坡稳定性、洞室稳定性、基坑开挖等岩土工程及环境的作用方面的方法研究，是地质工程中亟待开拓的研究领域，在地质灾害机理与防治研究及环境地质研究等方面具有广泛的应用前景。

参考文献：

- [1] 汤连生. 水—岩反应的力学与环境效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 681 - 682.
- [2] 王思敬. 论人类工程活动与地质环境的相互作用及其环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(1): 19 - 26.
- [3] 汤连生, 王思敬, 张鹏程, 等. 水—岩土化学作用与地质灾害防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 61 - 69.
- [4] 汤连生. 水—土化学作用的力学效应及机理分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(4): 104 - 109.
- [5] 李兴国, 许仲生. 分散性土的试验鉴别和改良[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 62 - 66.

Environmental Effects of Water-rock and Soil Interaction

TANG Lian-sheng

(Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Various examples of geoenvironmental hazard resulting from chemical damage of water-rock and soil interaction are analyzed. The environmental effects provided by both positive and negative mechanical effects of chemical action of water-rock and soil are expounded. The idea is proposed that synthesizing the laws on the environmental effects of chemical action of water-rock and soil can be used to ameliorate the physical and mechanical property of rocks and soils, and to manage and to control geoenvironmental hazard in geoenvironment. Lastly, the research thinking and the research methods on mechanical effects and environmental effects of water-rock and soil interaction are put forward and detailed. And the author thinks environmental effects of water-rock and soil interaction is a new research area which is well worth opening.

Keywords: chemical action of water-rock and soil; environmental effects; geoenvironmental hazard; manage; control