土壤风化速率研究及其应用①

杨金玲[1, 2]， 张甘霖[1,2]

（1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所），南京 210008； 2 中国科学院研究生院，北京 100049）

摘 要： 土壤矿物风化是土壤、也是整个生态系统中无机矿质养分的最重要来源，不仅为植物长期提供养分和保持土壤的化学平衡稳定性，并缓冲土壤和地表水的酸化，还影响全球气候变化。风化速率在全球碳循环、酸临界负荷和土壤侵蚀等研究中都是非常重要的参数。土壤化学风化是一个不断进行的自然释放过程，气候是最主要的驱动力，而矿物本身的稳定性也影响了风化速率的快慢。由于人为影响下的大气酸沉降和农业活动已经非常普遍，目前的土壤风化速率也因此而改变。本文从风化速率的研究方法、风化速率的影响因素以及风化速率在全球变化中的应用 3 个方面介绍了近年来在风化速率方面的研究进展，并探讨了相关研究未来的发展趋势。

关键词： 风化速率；土壤矿物；酸沉降；农业活动；碳循环；土壤侵蚀

中图分类号： P58

风化是土壤形成的基础，因而土壤矿物风化（以下简称土壤风化）一直被土壤学研究者所关注[1-3]。已有的研究已经获得了一些地区土壤的风化速率，但是由于研究方法和手段的差异以及土壤类型和气候的不同，所获得的风化速率差异非常大，甚至达到几个数量级。现代日益加剧的酸沉降也可能导致土壤风化速率的强烈变化[1]，因此这一问题更加受到关注。近年来，土壤风化对于陆地生态系统的重要性以及它同生物、水文和气候之间相互作用的重要性进一步被人们所认识，化学风化速率与水质、流域酸化、全球物质循环、大气二氧化碳平衡以及全球气候变化等方面的关系日益受到重视。

土壤风化速率不仅在土壤发生和土壤地球化学理论上有重要意义，而且可以为可持续的土壤资源管理提供重要依据[2]。Riebe等[3]指出定量化土壤风化速率和土壤侵蚀速率对于了解土壤、地貌、气候的长期发展非常重要。因而，土壤风化速率不仅能够为基础土壤学和土壤地球化学提供重要基本数据，估计土壤发生演化的趋势，还可以为土壤环境风险评价提供依据，服务于土壤资源可持续利用、生态建设和环境保护。

1 风化速率的研究方法

关于风化速率的研究方法国内外已经进行了比较多的探讨。续海金和马昌前[4]最近对风化速率的主要研究方法进行了详细的论述，并把风化速率计算的基本方法概括为: PROFILE模型、元素损耗、元素输入-输出指数、Sr 同位素比值，而且提出了每种方法的限制因素。他们还指出PROFILE 模型是一个稳定态模型，它并不考虑本身的酸化作用，而是直接评估土壤的最终化学状态[4]。因此，植被吸收、大气负荷和河流水输出的短期变化并不影响当前稳定状态，如此获得的风化速率是非常粗略的。加之该方法的温度矫正系数是在实验室条件下获得，在很多情况下，实验室和野外条件是不等同的。而基本阳离子损耗法计算流域的长期风化速率，前提是已知土壤剖面的风化年龄[4]。但是风化壳风化年龄的精确测定至今仍是困扰风化壳研究的一大难题。输入-输出指数法，也就是流域衡算法[5-6]，计算的是流域当前的平均风化速率。对于一个流域，假设它处于稳定状态，可以根据物质输入和输出平衡来估算土壤的风化速率[6]。Sr 同位素比值法也是常用的估算风化速率的方法[3, 7]，但Sr同位素法的关键因素是Sr 同位素在地壳风化系统，如植被、土壤交换场、河流水、大气沉降和矿物风化中的分配模式和标样的选择，难点是如何有代表性地系统采样[4]。

实际上除了以上方法以外，还有一些关于风化速率的研究方法，如实验室测定、经验方法和其他一些模型，如 MAGIC 模型、BIRKENES 模型、NAP 模型、ILWAS 模型等[5]。

①基金项目：国家自然科学基金面上项目（40601040）、江苏省自然科学基金项目（BK2007265）和中国科学院南京土壤研究所知识创新工程领域前沿项目（ISSASIP0704）资助。

作者简介： 杨金玲（1973—），女，山东烟台人，副研究员，博士研究生，主要从事土壤发生和土壤地球化学研究。E-mail: jlyang@issas.ac.cn

许多研究已经表明不同方法获得的土壤风化速率相差很大，实验室测定的速率至少比自然条件下导出的高一个数量级。如Swobada-Colberg 和Drever[8]实验室测定的风化率比田间测定的大几个数量级。同流域方法相比，模拟淋溶实验操作简单，花费较小，但却存在结果与实际偏差较大的问题。Dahlgren等[9]在华盛顿的一个冷湿森林生态系统中野外收集火山灰土淋出液来估算的风化速率比实验室测定的小 1 ~ 3 个数量级，但比野外流域方法获得的风化速率大。一般来说，这种差异是由实验室和实地条件不同，如土壤温度和湿度、土壤溶液浓度和pH 值、矿物含量和比表面积等造成的，需要对实验结果进行必要的校正。Hodson和Langan[10]应用经验公式和损耗方法计算发现随着土壤年龄的增大，风化速率下降；而应用PROFILE模型表明随着土壤发育年龄的增加，风化速率增大。这主要是由于PROFILE模型有很多假设，如假设矿物反应不随时间变化，假设全部的表面积等于反应表面积。Holmqvist等[11]认为，需要改善实验方法和数据，以提高PROFILE模型的准确性和精度，使其能够更好地描述风化动力学。

实际上，采用野外流域实测方法必须对所研究流域的大气输入和地表水的水文和水化学状况进行长期的监测，因而费时费力，相对代价高，但由此获得的风化速率是最符合实际的当前风化速率，也最具有实际意义，如Likens和Bormann[12]在新英格兰的Hubbard Brook流域进行了数十年的野外观测，获得了大量有关流域元素输入输出平衡和生态系统行为的重要数据。

2　风化速率的影响因素

风化速率的测定分为长期风化速率和当前风化速率。长期风化速率，有的学者也称为过去风化速率或历史风化速率，反映矿物内在特性和丰度以及长期的气候、土壤渗透性、地形的综合作用，指示土壤几万到几百万年的发展演化[13]。当前风化速率反映了当前的物流和降雨、气候、生物、人类活动如酸沉降、森林砍伐和农业活动等对矿物风化速率的影响，反映季节性到几十年变化影响下土壤的发展[13]。

对于长期风化速率和当前风化速率，人们也进行过充分的比较。理论上长期风化速率随着土壤年龄的增大而减小，这也被有关研究所报道[14]。但大多数学者研究表明，当前风化速率高于长期风化速率[15-16]。Bain和Langan[15]研究得到当前风化速率高于长期风化速率，甚至达到一个数量级以上。有关当前风化速率高于长期风化速率的原因，Paces[6]对易北河盆地、April等[17]对潘瑟湖流域和Bain和Langan[15]对苏格兰 7 个流域的研究都发现是由于工农业活动引起大气降水输入的H^+ 增加和土壤或水体酸化造成的；Land 等[16]对瑞典北部卡利克斯河流域的研究认为可能与气候（主要是温度）变化有关。可见，由于气候变化、人为活动和酸沉降的作用，已经明显地改变了土壤的风化速率，Wasklewicz[18]也强调了矿物风化过程中环境的重要性。所以，对土壤当前风化速率的研究显得更为重要和迫切。

2.1　土壤矿物风化的稳定性

土壤矿物风化是一个复杂的过程，依赖很多环境因素和矿物自身的物质组成特点。对于矿物风化稳定性的研究始于Goldich[19]的矿物风化稳定系列，该系列说明在高温和无水条件下形成的矿物，较之最后从较低温度含有更多水分的岩浆中结晶出来的矿物更易于风化，也就是说，矿物的结晶条件越接近现在地表上的条件，则在风化环境中其稳定性越高。矿物风化的稳定性与风化速率正好相反，越稳定的矿物风化速率越小。但同样的矿物在不同的环境条件下稳定性会产生差异，其他的因素也会影响到矿物风化的稳定性。有研究者在不同地区和实验条件下获得一些矿物的风化稳定性/速率与Goldich的矿物风化稳定系列并不一致[20-22]。Kirkwood和Nesbitt[20]在加拿大安大略湖的研究表明几种矿物的风化顺序为：蛭石＞斜长石＞钾长石＞角闪石＞石英；Pacheco和Van der Weijden[21]在葡萄牙北部通过监测泉水分析矿物的风化速率，发现镁橄榄石＞黝帘石＞绿泥石＞斜长石＞角闪石。Van der Weijden和Pacheco[22]通过研究大西洋群岛地下水的化学特性得到了一些矿物的风化速率，斜长石为（44 ± 19）mol/(hm^2·a)，橄榄石为（29 ± 14）mol/(hm^2·a)，辉石为（22 ± 13）mol/(hm^2·a)。这 3 种矿物的风化速率的大小顺序为斜长石＞橄榄石＞辉石，该风化速率的顺序与Goldich[19]的矿物稳定顺序以及Pacheco 和Van der Weijden[21-22]在葡萄牙北部的研究结果均不完全一致。当然也有与Goldich[19]矿物风化稳定系列一致的研究结果，如Bain等[7, 23]通过扫描电镜和通过土壤剖面中矿物的特性均表明了钾长石比斜长石更抗风化。这些近乎矛盾结果的出现主要是因为矿物风化的稳定性与颗粒的大小、颗粒的形状以及解理和包裹体有关。而且在通过地下水研究矿物风化速率的时候，研究区域的水文特点以及农业利用等也会对结果有所影响。因而矿物风化的稳定性受到很多外在因素和研究方法的影响，Goldich的矿物风化稳定系列也是特定条件下通常所理解的矿物可风化顺序，并不是绝对的。

土壤母质和矿物组成不同对酸沉降的响应也是有差异的[7]。生态系统对酸沉降的敏感性和脆弱性不同依赖土壤和母岩的缓冲容量[24]。Guicharnaud和Paton[1]的研究表明不同母质对酸缓冲容量的影响非常大，火山灰土比雏形土有更高的风化速率、淋溶潜能、离子交换和酸缓冲容量，在有强酸输入的情况下也能够保持相对稳定的pH。这是由于火山灰土是从玄武岩火山灰发育而来，具有非晶质矿物结构，溶解速率高；雏形土是从具有稳定矿物结构的辉长石发展而来。一般来说，铁镁质的岩石如玄武岩或辉长岩比长英岩石类如花岗岩有更大的风化潜能，因为铁镁质的岩石组成矿物的低稳定性和盐基离子更大的密度，火山玻璃比同样成分合成物的结晶火成岩有更高的分解速率[25]。第四纪红土、花岗岩和砂岩风化物发育的土壤因为含可风化矿物较少，因此酸缓冲性能低，为酸敏感土壤[26]。

2.2 气候对风化速率的影响

气候是影响矿物风化速率非常重要的因素。强烈的降雨伴随着风化产物的迅速迁移条件下会产生三水铝石，而在其他条件下需要几百万年。在总降雨量同样的情况下，有明显旱涝季节的气候区与降雨分配均匀的气候区相比，岩石风化可能会产生一系列完全不同的黏粒矿物[27]。金章东等[28]认为风化的英语单词“weathering”很好地阐释了风化与气候的联系，其实两者本身是相辅相成的。在目前的 CO_2 活度条件下，气温、地表径流量、植被、冰川等气候要素制约着地表岩石的风化率[29]。金章东等[28]的研究表明气候要素与硅酸盐化学风化速率之间并不存在简单的线性关系，但相对于年平均气温、径流量与硅酸盐化学风化率之间存在明显的相关性。在黄土–古土壤序列和湖泊流域风化研究中也表明强化学风化发生在夏季风盛行期[28-30]，这都说明水气循环对硅酸盐化学风化速率有更重要的制约作用。Stewart 等[31]在夏威夷应用锶同位素和模型方法得到降雨对风化速率有影响，表明高的年均降雨量情况下，土壤矿物内在风化是很高的。White 等[13]详细地描述了水化学发展和当前风化速率的一致性，说明了具有 300 万年发展历史的土壤风化和水文特征的直接联系。因而总的来说，随着气温和径流量的增加，硅酸盐化学风化率呈增大趋势。

2.3 酸沉降对风化速率的影响

酸沉降无疑会增加土壤中的H^+，从而促进土壤矿物的反应，增加它的风化速率。早在 20 世纪 80 年代就有研究认为当前更高的风化速率是由于酸沉降增加所引起的[17]。一些野外实际观测结果也显示酸沉降促进了土壤矿物的风化和淋溶。Frogner[32]在挪威西部 2 个人为酸化流域和 2 个对照流域研究化学风化速率，结果表明在 2 个处理流域中的Ca、Mg和Si的净输出比对照流域高大约 50%。Bain和Langan[15]在苏格兰 7 个流域 4 个不同岩石类型和不同大气污染水平下研究风化速率，数据显示当前风化速率比长期风化速率大，甚至有的流域高出 22 倍，这与大气污染所引起的酸沉降有一定的关系。Kirkwood 和 Nesbitt[20]在加拿大安大略湖的一个流域研究 12 000 年沉积历史的花岗岩冰渍物上发育的灰化土，发现目前从土壤中输出的阳离子是冰渍物长期平均输出量的 2 倍，现在高的化学风化很可能是人为输入到该流域中酸的增加所引起。Bain等[7]通过输入-输出指数计算的当前风化速率为 28.9 meq/(m^2·a)，也比长期风化速率（1.7 ~ 3.1 meq/(m^2·a)）大。

最近Golubev 等[33]采用测定水溶液中的CO_2对硅酸盐矿物中的Mg和Ca的溶解动力进行研究，发现CO_2对硅酸盐溶解的直接作用很弱，控制硅酸盐溶解的主要参数是土壤pH。仇荣亮和杨平[34]研究了 4 种土壤在不同模拟酸雨环境条件下土壤的风化特征，表明当pH下降到 3.5 以下，Si和Al的风化释放量迅速上升，Ca、Mg、K的释放量也明显增加，说明在强酸性酸雨的作用下土壤风化作用急剧加强。Guicharnaud和Paton[1]采用淋溶实验研究也发现酸沉降能够增加阳离子淋溶和风化速率。可见，酸沉降对土壤矿物当前风化速率的影响很深刻。

酸沉降能够促进矿物的风化，风化可以缓冲土壤和水体的酸化，也能够加速土壤养分的淋溶和有毒离子的移动[24, 35]。在酸化环境中几种元素的溶解性和移动性都有所增强。早期的研究就表明，过去的工业化造成欧洲和美国东北部地区酸尘降引起风化速率或盐基离子输出已经增加大约 3 个数量级[6, 17]。这也带来了一些较严重的后果，如美国东北部森林由于酸沉降已经引起Ca亏损[35]，由此将可能导致土壤、地表水酸化，并进一步恶化陆地和水生生态系统。

2.4 农业活动对风化速率的影响

关于风化速率的野外研究一般都选择森林流域，忽视了农业活动的影响[12]。当然也有一些流域研究考虑了化学物质的直接输入。Paces[6, 36]研究表明，在水文和地质条件基本相同的流域中，利用方式的不同使导出矿物的风化速率差异达到 3 倍，农业利用比森林利用明显加速水的酸化和土壤风化。Pacheco和Van der Weijden[21]在葡萄牙通过泉水中化学物质含量计算了农业土地利用下不同矿物的风化速率，说明了农业利

用中肥料的施用和作物的收获对水体中的离子含量有所影响，从而对矿物的风化有所贡献。Holmqvist等[11]首先采用实验方法将 PROFILE模型应用在农业土壤上，尽管在计算中有很多不确定性，但初步结果在很多方面还是很有用的，因为它能够比较不同农业生态系统的风化速率。

3　风化速率在全球变化研究中的应用

虽然从传统来说，土壤风化仅从地理形态学或地球化学的角度进行研究，近年来很多研究者已经将化学风化作为非常重要的生态参数来进行研究[37]。Riebe等[3]认为定量化土壤的化学风化速率和土壤侵蚀速率对于了解土壤、地貌、气候的长期发展是非常重要的。

3.1　风化速率在碳循环研究中的应用

随着全球工农业生产的发展，人类活动的加剧，促进了温室气体的排放，大气中温室气体含量有逐年增加的趋势。CO_2是重要的温室气体，它阻止热从地球上辐射出大气。目前CO_2对地球表面温度的影响已经引起人们极大关注。已经从各个领域开始研究对大气CO_2的固定。如近年来对土壤固碳、草原生态系统中的菌根固碳、湿地生态系统的储碳、固碳能力的相关研究都希望能够减少大气中CO_2的含量[38-40]。实际上，硅酸盐风化是地球CO_2含量重要调控者。硅酸盐风化将大气CO_2转变成河水中的重碳酸盐，进而在海洋中转变为碳酸盐沉积下来。只有通过地质火山或变质作用才可以返回到大气中[28]。

已经有很多研究集中在全球和小尺度范围内定量化硅酸盐风化在碳循环中的作用[29, 31, 41-42]。根据Louvat和Allègre [42]的研究，玄武岩风化对大气CO_2沉降起了主要作用。温度和径流对硅酸盐风化和CO_2的消耗具有很大影响。Dessert等[43]研究表明东南亚诸岛（印尼）和中美的CO_2消耗量占全球玄武岩风化CO_2消耗量的40%。这些地区的玄武岩面积并不是最大的，但它们具有最佳的气候条件，包括高温和径流，这样就具有高的CO_2消耗量。在西伯利亚温度和径流都太低而不利于玄武岩的化学风化。在埃塞俄比亚尽管有高的温度，但径流太小也不利于产生重要的化学风化和CO_2的消耗。Roy等[44]通过对塞纳河的监测并采用混合模型法研究得到巴黎盆地由于硅酸盐风化消耗的CO_2量为$(15\sim24)\times10^3$ mol/(km^2·a)，而相邻的花岗岩区域由于风化消耗的CO_2量比这个沉积排水区大 2 ~ 3 倍。Gaillardet等[41]通过大河的化学成分研究了全球来自硅酸盐风化而消耗的CO_2量为 13.6×10^{12} mol/a。而Dessert等[43]根据玄武岩河流和不同的数字地图，计算得到当今全球玄武岩风化而消耗的CO_2量大约是 4.08×10^{12} mol/a，是全大陆硅酸盐风化消耗CO_2量的 30%。这些数据足以说明了陆地玄武岩的风化对全球大气CO_2的消耗非常重要。

过去的几十年，有研究者努力解释地质时期地球表层的温度[28, 45-47]。这些研究表明，在长时间尺度上，通过大气 CO_2、气候、径流和硅酸盐风化相连接的负反馈，地球表面的温度是稳定的[45]。这些机理在很多重建地质时期 CO_2 循环的模型中应用。Schwartzman和Volk[47]认为在过去的至少40亿年中，风化已经降低了地球表面30℃～45℃，温度降低是通过 CO_2 消耗完成的。因此，化学风化速率随着温度的升高而增加，而风化通过消耗大气 CO_2 缓冲陆地气候大的温度转变[45]。所以金章东等[28]认为硅酸盐风化是地球的“自动调温器”。因而地球表面硅酸盐岩的化学和机械剥蚀作用可能影响全球碳循环以至全球气候。

3.2　风化速率在酸临界负荷研究中的应用

土壤风化提供了源源不断的盐基离子，并决定了土壤酸化的敏感性。从理论上说，pH 值为 4 的 1 000 mm 的降雨可以从系统中淋失 50 kg/hm^2 的 $CaCO_3$[12]。如果风化不能补充植物吸收，并消耗酸沉降中 H^+，土壤必然会酸化。有研究表明酸化过程能逐渐耗竭土壤的缓冲量，并且改变土壤颗粒的表面电荷，当超过土壤的缓冲能力在某一“转折点”之后，土壤不仅会很快酸化，产生不可逆转的危害，而且可能导致生物生产力的骤然下降，这种迹象已在中欧的森林生态系统中初露端睨[36]。因而化学风化的另一个重要特点是它对酸的缓冲性。矿物风化反应本身消耗酸，而且不同矿物风化对酸的消耗量存在一定差异，Kirkwood 和Nesbitt[20]研究蛭石、斜长石、钾长石、角闪石、石英的风化速率时发现，斜长石分解比其他矿物消耗更多的酸，占全部酸消耗的 60%，其次是钾长石，它消耗了20%。矿物对酸的缓冲与矿物风化速率密切相关。

临界负荷是当前国际上公认的进行有关酸沉降决策的科学手段和重要依据。酸临界负荷的原则是“全部输入到土壤中的 H^+ 不能超过原生矿物的风化所产生的碱度”，因而风化速率的确定是计算酸临界负荷的前提条件。部分国家为了确定酸临界负荷，展开了对矿物风化速率的研究以提供基础数据。Langan 和Wilson[48]应用矿物风化数据研究苏格兰的酸临界负荷，Eggenberger 和 Kurz[49]研究了瑞士森林土壤中矿物风化与酸临界负荷的关系，荷兰为了计算酸沉降的临界负荷也开始在森林生态系统研究土壤矿物的风化速率[50]。国内所进行的一些关于土壤风化速率的探索

性研究，也大多是出于对土壤缓冲酸沉降能力，从临界负荷研究目的出发[5, 34]。目前急需风化速率的数据来精确计算土壤酸临界负荷[5]。

3.3 风化速率在土壤侵蚀研究中的应用

土壤允许流失量的确定是一个非常复杂而又必须解决的问题，它关系到水土保持措施的布设和土壤的可持续利用。风化成土速率是制定土壤允许流失量的主要理论依据。从土壤发生学和保持土壤肥力的角度来看，土壤表层侵蚀速率不应超过风化成土速率。目前我国对水土流失的研究很多，而对于土壤风化成土速率的研究却鲜见报道。根据国际上已有的研究，大部分地区的土壤风化和形成速率小于 200 t/(km^2·a)[51-52]，但水利部颁布的不同地区土壤允许流失量为 200、500 或 1 000 t/(km^2·a)，也没有针对不同的地区和土壤类型制定精确的土壤允许流失量值。实际上，我国的土壤类型众多，成土环境复杂，风化成土速率差异非常大。尤其是在现代全球环境气候变化的条件下，土壤的风化成土速率也在发生变化[16-17]。如张丽萍等[2]在长江三峡花岗岩区研究得到新生代以来研究区的平均风化剥蚀速率与当地现代的风化剥蚀速率差异很大，与水利部颁布的当地土壤允许流失量相差近 1.5 ~ 4.5 倍。因此确定土壤允许流失量必须参考母岩风化速率。

在地质历史时期，侵蚀速率小于风化速率，否则地表不会有风化壳存在。但是目前由于强烈的人为活动影响，加剧了土壤侵蚀，很多地区的平均侵蚀速率高于岩石的自然风化速率。若不及时依据土壤风化成土速率加以保护，地表的风化壳就会逐渐变薄，以至于基岩裸露，给国家和人民造成巨大的损失。我国部分地区大面积的粗骨土就是由此而造成的[2]。若要维持土壤的正常发育，则应使土壤的侵蚀速率与母岩的风化速率相近似或小于风化速率。

过去的研究已经在不同地区积累了一些土壤侵蚀率的数据，但我国关于土壤风化速率的数据几乎是空白。持续的生态系统应当有一个土壤形成和侵蚀的平衡，如果土壤形成速率大于土壤侵蚀率，土层会越来越厚，土壤会进一步形成发展；如果土壤的侵蚀量不能及时地被土壤形成所补充，土壤就会退化，并可能出现土壤粗砾化和石化现象。所以，确定允许土壤流失量时应以土壤母岩的风化速率为参照依据。这是土壤资源可持续发展和利用必需的基础。

4 展望

目前国内在土壤风化速率方面的研究较少，虽然有相关的工作，但多是采用模拟淋溶实验和模型的方法[34, 53]。当研究从室内模拟走向实地观测时，在生物和气候条件一致的情况下，影响土壤风化和形成的主要因素是酸沉降和农业活动。近年来，由于大气污染引起酸沉降量的增加对部分地区的生态系统已经产生破坏。如导致土壤、地表水和地下水酸化。目前，土壤、河流和湖泊酸化是北美和西欧许多地区所面临的最严重的环境问题之一，中国也面临着同样的问题。因此酸沉降条件下的土壤风化速率已成为新的研究热点，土壤风化在酸化过程中的缓冲作用对生态环境敏感度或者稳定性具有重要意义，需要在野外对该方面进行深入的研究。

由于森林流域中物质的输入输出受人为影响相对较少，国内外已经进行的野外研究大多是在森林流域中，人为活动干扰较多的农业流域中的研究不多。实际上自然界中的流域大多有人类活动的参与，土壤矿物风化必然受到人为活动干扰。因而在自然和人为共同作用的农林流域中研究土壤风化速率更具有现实意义。

基于土壤风化速率研究的理论和现实意义，以及在全球气候变化、大气污染较重、酸沉降普遍、水土流失严重和农业利用中化肥施用过量的背景下，研究当前土壤矿物的风化速率应该成为生态环境研究领域中的一个重要课题。

参考文献：

[1] Guicharnaud R, Paton GI. An evaluation of acid deposition on cation leaching and weathering rates of an Andosol and a Cambisol. J. Geochem. Explor., 2006, 88: 279-283

[2] 张丽萍, 杨达源, 朱大奎. 母岩的风化剥蚀速率与土壤允许流失量的关系——以长江三峡坝区风化花岗岩土壤为例. 长江流域资源与环境, 2003, 12(4): 382-387

[3] Riebe CS, Kirchner JW, Finkel RC. Long-term rates of chemical weathering and physical erosion from cosmogenic nuclides and geochemical mass balance. Geochim. Cosmochim. Ac., 2003, 67(22): 4 411-4 427

[4] 续海金, 马昌前. 地壳风化速率研究综述. 地球科学进展, 2002, 17(5): 670-678

[5] 段雷, 郝吉明, 叶雪梅, 谢绍东. 中国土壤风化速率研究. 环境科学学报, 2000, 20(增刊): 1-7

[6] Paces T. Rate constants of dissolution derived from the measurements of mass balance in hydrological catchments. Geochim. Cosmochim. Ac., 1983, 47: 1 855-1 863

[7] Bain DC, Roe MJ, Duthie DML, Thomson CM. The influence of

mineralogy on weathering rates and processes in an acid-sensitive granitic catchment. Appl. Geochem., 2001, 16(7/8): 931−937

[8] Swobada-Colberg NG, Drever JI. Mineral dissolution rates in plot-field and laboratory experiments. Chem. Geol., 1993, 105: 51−69

[9] Dahlgren RA, Ugolini FC, Casey WH. Field weathering rates of Mt. St. Helens tephra. Geochim. Cosmochim. Ac., 1999, 63(5): 587−598

[10] Hodson ME, Langan SJ. The influence of soil age on calculated mineral weathering rates. Appl. Geochem., 1999, 14(3): 387−394

[11] Holmqvist J, Øgaard AF, Öborn I, Edwards AC, Mattsson L, Sverdrup H. Application of the PROFILE model to estimate potassium release from mineral weathering in Northern European agricultural soils. Eur. J. Agron., 2003, 20 (1/2): 149−163

[12] Likens GE, Bormann FH. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. 2 edition. New York: Springer-Verlag, 1995

[13] White AF, Schulz MS, Vivit DV, Blum AE, Stonestrom DA, Harden JW. Chemical weathering rates of a soil chronosequence on granitic alluvium: III. Hydrochemical evolution and contemporary solute fluxes and rates. Geochim. Cosmochim. Ac., 2005, 69(8): 1 975−1 996

[14] Taylor A, Blum JD. Soil age and silicate weathering rates determined from the chemical evolution of a glacial chronosequence. Geology, 1995, 23(11): 979−982

[15] Bain DC, Langan SJ. Weathering rates in catchments calculated by different methods and their relationship to acidic inputs. Water Air Soil Poll., 1995, 85: 1 051−1 056

[16] Land M, Ingri J, Ohlander B. Past and present weathering rates in northern Sweden. Appl. Geochem., 1999, 14: 761−774

[17] April R, Newton R, Coles LT. Chemical weathering in two adirondack watersheds: Past and presentday rates. Geol. Soc. Am. Bull., 1986, 97: 1 232−1 238

[18] Wasklewicz TA. Importance of environment on the order of mineral weathering in olivine basalts, Hawaii. Earth Surf. Proc. Land., 1994, 19: 715−734

[19] Goldich SS. A study in rock weathering. J. Geol., 1938, 46: 17−58

[20] Kirkwood DE, Nesbitt HW. Formation and evolution of soils from an acidified watershed: Plastic Lake, Ontario, Canada. Geochim. Cosmochim. Ac., 1991, 55(5): 1 295−1 308

[21] Pacheco FAL, Van der Weijden CH. Mineral weathering rates calculated from spring water data: A case study in an area with intensive agriculture, the Morais Massif, northeast Portugal. Appl. Geochem., 2002, 17: 583−603

[22] Van der Weijden CH, Pacheco FAL. Hydrochemistry, weathering and weathering rates on Madeira island. J. Hydrol., 2003, 283 (1/4): 122−145

[23] Bain DC, Mellor A, Wilson MJ, Duthie DML. Chemical and mineralogical weathering rates and processes in an upland granitic till catchment in Scotloand. Water Air Soil Poll., 1994, 73: 11−27

[24] Tao F, Hayashi Y, Lin E. Soil vulnerability and sensitivity to acid deposition in China. Water Air Soil Poll., 2002, 140: 247−260

[25] Wolff-Boenisch D, Gislason SR, Oelkers EH. The effect of crystallinity on dissolution rates and CO_2 consumption capacity of silicates. Geochim. Cosmochim. Ac., 2006, 70: 858−870

[26] 吴甫成, 王晓燕, 邹君, 彭世良. 湖南土壤酸缓冲性能研究. 农业现代化研究, 2001, 22(1): 58−62

[27] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚等, 著. 土壤发生与系统分类. 北京: 科学出版社, 2007

[28] 金章东, 李英, 王苏民. 不同构造带硅酸盐化学风化率的制约: 气候还是构造? 地质论评, 2005, 51(6): 672−680

[29] White AF, Blum AE. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. Geochim. Cosmochim. Ac., 1995, 59: 1 729−1 747

[30] Guo ZT, Biscaye P, Wei LY, Chen X, Peng SZ, Liu TS. Summer monsoon variations over the last 1.2 Ma from the weathering of loess—soil sequences in China. Geophys. Res. Lett., 2000, 27: 1 751−l 754

[31] Stewart BW, Capo RC, Chadwick OA. Effects of rainfall on weathering rate, base cation provenance, and Sr isotope composition of Hawaiian soils. Geochim. Cosmochim. Ac., 2001, 65(7): 1 087−1 099

[32] Frogner T. The effect of acid deposition on cation fluxes in artificially acidified catchments in western Norway. Geochim. Cosmochim. Ac., 1990, 54(3): 769−780

[33] Golubev SV, Pokrovsky OS, Schott J. Experimental determination of the effect of dissolved CO_2 on the dissolution kinetics of Mg and Ca silicates at 25°C. Chem. Geol., 2005, 217(3/4): 227−238

[34] 仇荣亮, 杨平. 南方土壤酸沉降敏感性研究 Ⅴ. 模拟酸雨条件下土壤矿物风化特征. 中山大学学报（自然科学版）, 1998(4): 89−93

[35] Likens GE, Driscoll CT, Buso DC. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem. Science, 1996, 272: 244−246

[36] Paces T. Source of acidification in Central Europe estimated from elemental budgets in small basins. Nature, 1985, 315(2): 31−36

[37] Carey AE, Lyons WB, Owen JS. Significance of landscape age, uplift, and weathering rates to ecosystem development. Aquat. Geochem., 2005, 11: 215−239

[38] Yu DS, Shi XZ, Wang HJ, Sun WX, Chen JM, Liu QH, Zhao YC. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China. J. Environ. Manage., 2007, 85: 680−689

[39] 段晓男, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 463−469

[40] 石伟琦, 夏运生, 刘晓蕾. 丛枝菌根在草原生态系统碳固持中的重要作用. 生态环境, 2008, 17(2): 846−850

[41] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, Allègre CJ. Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. Chem. Geol., 1999, 159(1/4): 3−30

[42] Louvat P, Allègre CJ. Present denudation rates at Réunion island determined by river geochemistry: Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. Geochim. Cosmochim. Ac., 1997, 61: 3 645−3 669

[43] Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, François LM, Allègre CJ. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. Chem. Geol., 2003, 202: 257−273

[44] Roy S, Gaillardet J, Allègre CJ. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine River, France: anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering. Geochim. Cosmochim. Ac., 1999, 63(9): 1 277−1 292

[45] Berner RA, Lasaga AC, Garrels RM. The carbonatesilicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 millions years. Am. J. Sci., 1983, 284: 641−683

[46] Walker JCG, Hays PB, Kasting JF. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. J. Geophys. Res., 1981, 86: 9 776−9 782

[47] Schwartzman D, Volk T. When soil cooled the world. New Sci., 1991, 131: 33−36

[48] Langan SJ, Reynolds B, Bain DC. The calculation of base cation release from mineral weathering in soil from Paleozoic greywackes and shales in upland UK. Geoderma, 1996, 69: 275−285

[49] Eggenberger U, Kurz D. A soil acidification study using the PROFILE model on two contrasting regions in Switzerland. Chem. Geol., 2000, 170(1/4): 243−257

[50] Van der Salm C. Assessment of the regional variation in weathering rates of loess and clay soils in the Netherlands. Water Air Soil Poll., 2001, 131: 217−243

[51] Benedetti MF, Dia A, Riotte J, Chabaux F, Gérard M, Boulègue J, Fritz B, Chauvel C, Bulourde M, Déruelle B, Ildefonse P. Chemical weathering of basaltic lava flows undergoing extreme climatic conditions: The water geochemistry record. Chem. Geol., 2003, 201: 1−17

[52] Das A, Krishnaswami S, Sarin MM, Pande K. Chemical weathering in the Krishna Basin and Western Ghats of the Deccan Traps, India: Rates of basalt weathering and their controls. Geochim. Cosmochim. Ac., 2005, 69: 2 067−2 084

[53] Xie S, Hao J, Zhou Z, Qi L, Yin H. Assessment of critical loads in Liuzhou, China using static and dynamic models. Water Air Soil Poll., 1995, 85: 2 401−2 406

Soil Weathering Rate and Its Applications: A Review

YANG Jin-ling[1, 2], ZHANG Gan-lin[1,2]

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture* (*Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*), *Nanjing* 210008, *China*; 2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Chemical weathering of soil minerals is a continuous and dynamic geochemical process, which can enhance the supply of base cations, determine the long-term availability of plant nutrients and the chemical status of the soils, can buffer against atmospheric acid deposition and alleviate soil and surface water acidification. Furthermore chemical weathering is closely related to global climate change, thus the weathering rate is an important parameter in understanding global carbon cycle, critical loads of acid deposition and tolerable soil erosion rate. Chemical weathering of soil minerals releases actively base cations with the climate is the major driving force and mineral stability can affect the rate. With the change of global climate and increasing acid deposition, soil mineral weathering rates are subjected to be accelerated. In this paper, we reviewed the progress in research methods, controlling factors and applying fields of soil mineral weathering rate, and discussed the prospect and research direction in the near future.

Key words: Weathering rate, Soil minerals, Acid deposition, Agricultural activities, Carbon cycle, Soil erosion