

黄来明,邵明安,贾小旭,等. 土壤风化速率测定方法及其影响因素研究进展[J]. 地球科学进展,2016,31(10):1021-1031,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2016.10.01021. [Huang Laiming, Shao Ming'an, Jia Xiaoxu, et al. A review of the methods and controls of soil weathering rates[J]. Advances in Earth Science,2016,31(10):1021-1031,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2016.10.01021.]

土壤风化速率测定方法及其影响因素研究进展*

黄来明^{1,2,4},邵明安^{1,2,4},贾小旭^{1,4},张甘霖^{3,4}

- (1. 生态系统网络观测与模拟院重点实验室,中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;
2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨陵 712100;
3. 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,江苏 南京 210008;
4. 中国地质大学资源与环境学院,北京 100049)

摘要:明确土壤风化过程、速率及其影响因素是理解土壤与环境之间相互作用与反馈的基础,可为预测土壤在生态系统中的行为及其在自然和人为作用下的演变趋势、实现土壤资源有效管理提供科学依据。通过回顾土壤风化速率不同测定方法(实验室模拟研究、模型理论计算、同位素比值、元素损耗和元素输入输出平衡法)及其影响因素(气候、生物、母质、地形、时间和人为活动)研究所取得的进展,针对当前土壤资源退化严重的现状,提出了土壤风化研究面临的机遇和挑战。未来土壤风化研究应重点关注变化中的自然条件和强烈的人为干扰下土壤风化的关键过程、速率及其环境阈值,包括建立风化速率不同测定方法所得结果之间的定量转换关系、揭示风化速率多个影响因素之间的协同效应、模拟和预测气候变化和人类活动双重影响下土壤风化速率的演变趋势,以期为土壤资源的可持续管理和应对全球变化提供理论依据。

关键词:风化速率;地球化学质量平衡;同位素;环境阈值;地球关键带

中图分类号:P59 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-8166(2016)10-1021-11

1 引言

风化是土壤形成的基础,是自然生态系统中植物所需矿质养分的重要来源,同时也是生物地球化学循环过程的重要组成部分^[1]。土壤中被植物吸收以及淋溶损失的盐基离子主要通过矿物风化和大气输入来补充,若矿物风化和大气沉降进入土壤中的盐基离子不能平衡生物吸收、侵蚀及淋溶损失的盐基离子,土壤将发生酸化。因此,土壤风化是维持生态系统酸中和能力,缓冲土壤酸化的主要机

制^[2],风化速率大小是确定生态系统酸沉降临界负荷和土壤允许流失量的基础^[3,4]。此外,土壤中硅酸盐矿物风化过程在地质时间尺度上能够消耗大气中的CO₂,对全球碳循环和气候变化具有深远影响^[1,5]。可见,土壤风化速率研究不仅在土壤发生和地球化学理论上具有重要意义,而且可以为可持续的土壤资源管理和准确预测未来气候变化提供科学依据。

土壤是一个复杂的开放体系,因此,土壤风化速率不仅受土壤本身矿物组成的影响,而且还受外界

* 收稿日期:2016-07-02;修回日期:2016-09-10.

* 基金项目:国家自然科学基金国际合作与交流项目“黄土高原关键带水循环过程与空间异质性”(编号:41571130081);中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目“退耕驱动地表特性变化对黄土高原半干旱区土壤水循环的影响”(编号:A314021402-1602)资助。

作者简介:黄来明(1984-),男,浙江安吉人,助理研究员,主要从事土壤发生与地球化学研究. E-mail:yaoying@pku.edu.cn

环境条件(气候、生物、母质、地形、时间)和人为活动的共同作用。长期以来,由于研究方法和手段的差异以及自然与人为作用的方式和强度不同,所获得的土壤风化速率差异非常大,甚至达到几个数量级。这给不同地区制定合理的酸沉降临界负荷和土壤允许流失量带来了困难,从而影响土壤资源的可持续利用与管理。鉴于此,本文旨在全面总结土壤风化速率不同测定方法的基础上,系统分析影响土壤风化速率的各种因子,并对该领域今后可能的发展方向进行展望,以期为土壤学、水土保持学和生态学等领域的研究工作提供方法和理论基础。

2 土壤风化速率的研究方法

关于风化速率的研究方法国内外学者已经进行了广泛而深入的研究,并取得了一些令人鼓舞的成就。续海金等^[6]综述了风化速率的 4 种常用方法,即 PROFILE 模型、基本阳离子损耗、元素输入输出指数和 Sr 同位素比值,并指出每一种方法都存在一定的局限性,必须同时依靠多种方法进行研究,才可能获得较为准确的风化速率。除了上述 4 种常用的风化速率研究方法,土壤风化速率还可以通过实验室模拟、MAGIC 模型、U 同位素等方法进行测定。针对近年来国内外学者采用不同方法研究土壤风化速率取得的新进展,本文主要从以下几个方面进行归纳和总结:①实验室模拟研究;②模型理论计算法;③同位素比值法;④元素损耗法;⑤元素输入输出平衡法。

2.1 实验室模拟研究

模拟淋溶实验可以直接测定土壤风化速率,其采用一定 pH 值的去离子水对土柱进行淋溶,并假定土壤的化学风化速率等于阳离子从土柱中淋溶出来的速率。该方法的优点是操作简单,且可以严格控制影响土壤风化的条件,缺点是室内模拟的风化周期相对较短,通过淋溶实验获得的风化速率外推到自然界时存在很大的不确定性。因此,室内模拟淋溶实验主要适用于研究土壤风化的机理,而不适用于定量测定土壤风化速率的大小^[7]。

樊后保等^[8]利用不同 pH 值的淋溶液模拟了酸雨对 4 种山地土壤风化速率的影响。结果表明,盐基离子的淋溶量均随模拟酸雨 pH 值的降低而增加,当淋溶液 pH=2.0 时,模拟酸雨不仅加速了土壤矿物风化,而且增加了土壤中铝离子的释放。冯志刚等^[9]以饱和 CO₂ 水作为淋溶液,模拟了不同气候条件下(干冷、干热和湿热)碳酸盐岩—土界面的风

化作用,结果表明碳酸盐岩的溶蚀强度表现为干冷>干热>湿热的变化趋势。Guicharnaud 等^[10]通过对 2 种土壤进行长达 34 年的酸雨淋溶实验,结果表明火山灰土的盐基离子淋溶量随酸沉降增加而增加的幅度明显高于锥形土。Zhang 等^[11]研究也指出酸沉降对土壤盐基离子淋失的影响不仅与酸雨 pH 值直接相关,而且还受土壤本身 pH 值的影响。

由于室内模拟淋溶实验的环境条件与野外实际状况有很大差异,实验室测定的土壤风化速率往往比野外高出几个数量级^[12~15]。White 等^[15]认为自然土壤中不同类型矿物混杂,与实验室中“标准”矿物相比,其表面积较小;同时田间土壤存在大孔隙流,并且可以形成次生黏土矿物和风化壳,这些因素都会导致田间土壤风化速率减小。

2.2 模型理论计算法

目前可对风化速率进行数学模拟的方法主要包括 PROFILE, MAGIC, BIRKENES, NAP, MIDAS, ILWAS 和 RESAM 模型,其中最常用的为 PROFILE 和 MAGIC 模型^[6,16]。PROFILE 和 MAGIC 都是酸化模型,近年来已被广泛用于计算土壤风化速率,并且应用 MAGIC 模型计算的风化速率一般低于 PROFILE 模型^[17,18]。

PROFILE 模型是一个稳定态的综合土壤化学模型,其理论基础是迁移状态理论和森林生态系统中土壤酸化的动力学速率法则,它不仅可用于计算土壤风化速率,还可用来确定土壤和地表水的酸沉降临界负荷^[19]。PROFILE 模型的最大特点是能用一组独立的土壤性质来计算风化速率,这不仅降低了模型计算风化速率的随意性,同时还避免了数学上的循环验证。根据 PROFILE 模型,自然界中土壤风化速率为土壤中所有矿物的风化速率之和: $R_w = \sum_{i=1}^{土层} \sum_{j=1}^{矿物} r_j \cdot A_w \cdot x_j \cdot \theta \cdot z$, (其中 r_j 是第 j 种矿物产生盐基阳离子的速率(keq/($hm^2 \cdot a$)), A_w 是矿物的暴露表面积(m^2/m^3), θ 是土壤水饱和度(%), z 是土壤层厚度(m), x_j 是矿物的表面积)。段雷等^[14]应用 PROFILE 模型对中国十几种主要土壤类型的风化速率进行了研究,结果表明中国南方富铝土区域(包括砖红壤、红壤和黄棕壤等)以及东北的硅铝土区(包括暗棕壤、黑土和漂灰土等)的风化速率普遍较低($< 1.0 \text{ keq}/(hm^2 \cdot a)$),土壤酸缓冲能力较弱。Stendahl 等^[20]利用 PROFILE 模型对瑞士 16 个森林流域的土壤风化速率进行了计算,结果表明盐基离子的总风化速率为 $1.2 \sim 13.5 \text{ keq}/(hm^2 \cdot a)$,

平均为 $3.9 \text{ keq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 并且土壤释放不同盐基离子 (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 的速率也不同。

MAGIC 模型是一个动态的流域概念模型, 它包含了流域内具有代表性并起主导作用的水文地球化学过程^[21]。在 MAGIC 模型中, 土壤的风化速率是通过模型校验得到的。模型校验的基本方法是先通过实验分析或从已有的文献资料中获取所研究地区土壤参数(包括每种盐基阳离子的风化速率以及选择性系数等)的变化范围, 然后通过 Monte-Carlo 方法在上述范围内任取一套参数代入模型进行回顾计算, 即根据已有的数据从几十年或上百年前的稳定状态计算到现状。如果模拟计算结果与实测值不一致, 则对所选参数在上述范围内进行调整, 并进行反复计算, 直至模拟结果与实测结果一致为止。应用 MAGIC 模型计算土壤风化速率时只考虑离子的交换和吸附、Al 的溶解和迁移、矿物风化以及碳酸解离等主导过程。

2.3 同位素比值法

利用同位素比值法既可以测定土壤当前风化速率, 也可以测定土壤历史(或长期)风化速率。近年来, Sr 同位素在流域和全球尺度上被广泛应用于示踪化学风化过程^[22, 23], 从而为研究生态系统中元素循环和迁移途径提供了新的技术手段。利用 Sr 同位素计算土壤风化速率的基本原理是: Sr 同位素在参与生物和化学过程中并不产生分馏, 因此, 不同生态系统中 Sr 同位素组成是大气和矿物风化来源 Sr 的混合物^[24, 25]。若雨水和河水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值明显不同, 并且可以获得风化来源 Sr 的可靠 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 则可以通过 Ca 的输入输出平衡计算 Ca 的风化速率, 这是因为 Ca 和 Sr 有着相似的地球化学行为。Åberg 等^[24] 对瑞士中南部 Malingsbo-Kloten 地区 Baskbacken 流域的降雨、地下水、河水以及矿物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值进行分析, 获得了 Ca 的当前风化速率 ($0.2 \text{ kmol}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)。Miller 等^[25] 应用 Sr 同位素研究了土壤风化速率和可交换性阳离子的损耗速率, 结果表明, 矿物风化释放阳离子的速率 ($1.5 \text{ kmol}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 比阳离子的年均剥蚀速率 ($1.2 \text{ kmol}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 略高。Sr 同位素比值法通常假设基岩风化释放的 Sr 具有与母岩相同的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 且该比值不随风化时间而变化^[24, 25]。但有研究表明, 花岗岩风化残余物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值历经下降—升高—下降的波动变化^[26]。因此, 利用 Sr 同位素示踪流域和全球范围的生物地球化学过程时, 必须慎重考虑矿物溶解过程中 Sr 的优先释放以及

含 Sr 矿物相对风化速率变化导致的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的波动。

除了 Sr 同位素, U 同位素也被广泛用来计算土壤风化速率。Moreira-Nordemann^[27] 首先提出 U 同位素法, 并应用该法计算得到巴西巴伊亚州 Preto 河流盆地的岩石风化速率为 $0.04 \text{ mm}/\text{a}$ (即风化 1 m 厚的岩石大约需要 25 000 年)。Conceição 等^[28] 以 ^{238}U 为示踪元素计算得到巴西圣保罗州 Corumbatai 河流盆地的土壤风化速率为 $0.0265 \text{ mm}/\text{a}$ (即风化 1 m 厚的岩石大约需要 37 735 年)。Ma 等^[29] 利用 U 系 (^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th) 研究了美国宾夕法尼亚页岩关键带的风化成土速率, 结果表明, 从山脊到山谷随着土壤厚度的增加, 风化成土速率从 $0.045 \text{ mm}/\text{a}$ 下降到 $0.017 \text{ mm}/\text{a}$, 并指出坡向对风化成土速率具有显著影响, 阳坡风化成土速率 ($(0.050 \pm 0.015) \sim (0.052 \pm 0.015) \text{ mm}/\text{a}$) 明显高于阴坡 ($(0.017 \pm 0.014) \sim (0.018 \pm 0.013) \text{ mm}/\text{a}$)。

2.4 元素损耗法

元素损耗法主要适用于单个土壤剖面, 用于计算土壤长期风化速率, 也称过去风化速率或历史风化速率^[30, 31]。Bain 等^[32] 详细阐述了元素损耗法的原理及其应用, 指出土壤风化损耗的盐基阳离子可以通过比较土层与成土母质之间元素组成的差异来计算。这里假设土壤中尚未风化的部分(土壤 C 层)代表成土母质, 并且认为 Zr, Ti, Nb 或石英在成土过程中稳定且不参与风化反应, 因此各土层盐基离子含量之和相对于母质中 Zr, Ti, Nb 或石英的改变量就是盐基离子的损耗量, 该损耗量除以土壤年龄就可以得到土壤风化速率。

利用元素损耗法计算土壤长期风化速率有 3 个基本前提^[30~32]: ①每个土壤剖面都由均一的成土母质发育而来, 并且没有外源物质的加入; ②参比元素 (Zr, Ti, Nb 或石英) 在土壤风化过程中稳定且不受成土过程的影响; ③土壤最下层的 C 层代表成土母质并且未受到风化过程的影响。显然, 自然界中的土壤很难同时满足上述 3 个条件。首先, 大气干湿沉降长期作用于土壤, 能够改变土壤的物质组成, 并且土壤年龄难以精确测定, 从而影响风化速率的计算。其次, 研究表明土壤中抗风化能力极强的元素 (Ti, Zr, Nb) 在氧化还原作用下可随胶体的运移而发生迁移^[33]。此外, 许多学者在研究中通常未经过母质均一性判定而直接将 C 层定义为成土母质, 事实上这很容易得出错误的结论。Jenny^[34] 将成土母质定义为任意标准状态下土壤系统的初始状况, 然

而成土母质的准确判定仍然存在很多假设,这也为利用元素损耗法精确测定土壤风化速率带来了很大的不确定性。

2.5 元素输入输出平衡法

元素输入输出平衡法又称流域方法,主要用于计算流域当前平均风化速率。其基本原理是元素地球化学质量平衡,目前该方法在小流域研究中得到了广泛应用^[35]。根据元素地球化学质量平衡原理可知,流域内元素的输入途径主要包括大气干湿沉降、土壤矿物风化和生物归还,输出途径主要包括径流输出、次生黏土矿物形成和生物吸收。在农业流域中,元素的输入与输出还应考虑农业活动的影响,即人为输入与输出(图 1)^[35]。因此,对研究区的大气沉降和径流水水化学进行长期监测和规律采样(通常是每隔一周或一个月),同时结合流域内人为活动和生物作用的影响,利用元素地球化学质量平衡方程式就可以计算出流域当前的平均风化速率。元素输入输出平衡法不受热力学性质的影响^[35],而仅仅依赖于野外监测和实验室分析。许多学者在应用元素输入输出平衡法计算风化速率时,通常假设流域处于稳定状态,即流域内生物吸收消耗的元素与生物归还进入土壤中的元素达到平衡。事实上,很少有流域处于稳定状态,有研究表明考虑植物因素比忽略植物作用获得的土壤风化速率几乎高四倍^[36]。元素输入输出平衡法的另一个前提条件是基岩不透水,即元素的输入与输出不受地下水的影响^[35]。尽管元素输入输出平衡法存在一些理论假设和前提条件,但仍然被认为是定量研究地表过程和元素迁移最可靠的手段,同时也是目前野外测定土壤风化速率最为精确的方法^[35]。

Wakatsuki 等^[37]和 Huang 等^[38]利用盐基离子(Ka, Na, Ca, Mg)和可溶性 Si 等元素的质量平衡方程式,并采用多元回归分析获得了世界上不同流域的土壤风化速率。结果表明,位于印度尼西亚热带雨林地区的安山岩流域土壤风化速率为 $(3.0 \pm 0.8) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,位于日本亚热带地区的花岗岩和火山碎屑岩流域土壤风化速率分别为 1.4 ± 0.5 和 $(5.9 \pm 1.7) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,而位于我国亚热带地区酸沉降严重影响下的花岗岩流域土壤风化速率为 $(1.04 \pm 0.65) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,均远高于美国温带地区 Hubbard Brook 流域的土壤风化速率 $((0.16 \pm 0.2) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a}))$ 。

2.6 土壤风化速率不同测定方法的比较

土壤风化速率不同测定方法之间的比较见表

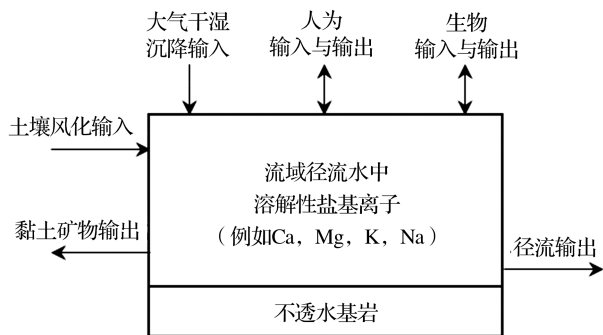


图 1 流域元素地球化学质量平衡图

Fig. 1 Geochemical mass balance in watersheds

1。从表 1 可以看出,不同方法的适用范围不同,且每种方法既有优点,也有局限性,因此,在实际应用中应根据每种方法的适用范围和研究目的来确定合适的风化速率测定方法。一些学者尝试同时用多种方法来测定土壤风化速率,并比较了它们之间的差异^[14,17,18,39]。段雷等^[14]研究表明模拟淋溶实验获得的土壤风化速率比田间风化速率高出几个数量级。Langan 等^[18]指出利用元素损耗法研究单个剖面的土壤风化速率时,使用的是“某一点”的数据,而利用流域方法研究土壤风化速率时,所用的数据为流域内不同土壤的平均值,前者计算的是研究区内某一点的土壤风化速率,而后者获得的是流域内土壤的平均风化速率。此外,土壤风化的时间尺度也会影响风化速率的大小,研究表明土壤当前风化速率远高于土壤长期风化速率^[17]。Augustin 等^[39]最近采用元素损耗法、元素输入输出平衡法和 PROFILE 模型研究了加拿大魁北克地区 21 个流域土壤盐基离子的风化速率,结果表明,3 种方法获得的盐基离子平均风化速率分别为 (0.41 ± 0.09) , (1.20 ± 0.17) 和 $(1.71 \pm 0.22) \text{ kmol}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,并且元素输入输出平衡法和 PROFILE 模型获得的风化速率之间可以建立定量的回归模型,表明在该地区采用这 2 种方法均可以获得较为准确的风化速率。

综上所述,土壤风化速率的不同测定方法都存在一定的局限性,且不同方法的计算结果差异较大。目前还没有建立能够精确测定土壤风化速率的“标准方法”,因此,必须同时依靠多种方法进行研究,才能获得较为可靠的风化速率。

3 土壤风化速率的影响因素

影响土壤风化速率的因素可以概括为内部因素和外部因素 2 个方面^[40]。内部因素主要为土壤矿

表 1 土壤风化速率不同测定方法的比较

Table 1 Comparison of different methods for measuring soil weathering rate

方法	原理	前提条件	适用范围
实验室模拟研究	用一定 pH 值去离子水模拟淋溶土柱	土壤风化速率等于离子从土壤中淋溶出的速率	矿物风化机制研究
模型理论计算法	迁移状态理论和动力学速率法则	土壤物质组成保持不变 模型参数均用平均值	单个土壤剖面土壤风化速率研究
同位素比值法	同位素分馏机制	风化产物的同位素比值与母岩相同且保持不变	当前风化速率或长期风化速率研究
元素损耗法	不同土层和母岩之间元素含量的差异	成土过程中参比元素稳定且不参与风化反应	单个土壤剖面长期风化速率研究
元素输入输出平衡法	地球化学质量平衡	流域处于稳定状态(植物吸收和归还的养分平衡),基岩不透水	小流域土壤当前平均风化速率研究

物的组成、结构和性质,一般来说土壤矿物类型和性质不同,其抗风化能力也不同。White^[40]详细论述了矿物类型、表面积和结晶度等对矿物风化速率的影响,本文不再赘述。外部因素又可分为自然因素和人为因素,前者主要包括气候、生物、母质、地形和时间,又称为五大成土因素^[34],后者主要为工业和农业活动。影响土壤风化速率的外部因素往往相互作用,很难区分。为了定量研究不同因素对土壤风化速率的影响,许多学者采用“因子分析法”,即选取某个因子作为变量并最大限度地减小其他因子的差异,从而研究某一特定因子对土壤风化速率的影响,本文重点讨论外部因素对土壤风化速率的影响。

3.1 气候对土壤风化速率的影响

风化(weathering)一词隐含着化学风化受气候因素的强烈影响。Van't Hoff^[41]早在 1884 年就发现温度每升高 10 °C,化学反应速率通常增加 2~4 倍。Ramann^[42]提出了风化指数的概念(即 1 年中温度高于 0 °C 的天数与水的相对解离度相乘所得),并指出热带地区土壤风化速率比温带和北极地区分别高 3 倍和 9 倍。White 等^[43]研究发现温度对硅酸盐矿物风化速率的影响可以用 Arrhenius 方程来描述: $r=Ae^{(-Ea/RT)}$,其中 Ea 为活化能(kJ/mol), T 为温度(K), R 是气体常数, A 是常量系数。降雨是影响土壤风化速率的另一个重要气候因子。Stewart 等^[44]选取了夏威夷地区的一个降雨气候带,通过测定土壤硅酸盐矿物中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值及阳离子含量,定量研究了降雨量对土壤风化速率的影响。结果表明,在相对干旱地区(年平均降雨量≤1 400 mm),土壤风化速率随着降雨量增加缓慢增大,符合指数增长型;而在湿润地区(年平均降雨量>1 400 mm),土壤风化速率随着降雨量增加迅速增大,符合

线性关系。Huang 等^[38]在我国亚热带湿润地区的研究结果同样证实了土壤风化速率随降雨量的增加呈现线性上升的趋势。

温度和降雨对土壤风化速率的影响往往很难分开,特别是在雨热同季的地区,二者对土壤风化速率还具有交互作用。White 等^[43]对分布于全球的 86 个花岗岩流域的径流水水质数据进行分析,提出了影响风化速率的温度—降雨耦合模型。该模型是线性方程(降雨影响)和 Arrhenius 方程(温度影响)的综合产物,可以更精确地评价气候对土壤风化速率的影响。Huang 等^[38]采用多元回归分析,综合评价了温度、降雨量及酸沉降中 H⁺ 输入量对土壤风化速率的影响,结果表明,多元回归模型在评价气候对土壤风化速率的影响时优于一元回归模型。

3.2 生物对土壤风化速率的影响

生物在土壤风化过程中的作用是地球关键带科学研究的重要科学问题之一。地球自生命诞生以来,生物活动便加快了岩石与土壤风化。研究表明,若没有生物的出现,地球表面的温度将比现在高好几倍,这将导致除原始微生物以外的其他生物无法生存^[45]。影响土壤风化的生物因素主要包括微生物、植物和动物,下面将分别论述微生物、植物和动物对土壤风化速率的影响。

3.2.1 微生物对土壤风化速率的影响

微生物风化作用是地球上广泛发生的一种地质作用。Müntz^[46]早在 1890 年就研究了细菌在岩石和土壤风化中的作用,开创了微生物风化研究的先河。此后,微生物对土壤或矿物风化的影响一直是学者们研究的热点问题。连宾等^[47]和吴涛等^[48]总结并概括了微生物影响土壤风化的 4 种途径:①微生物通过在土壤矿物表面和缝隙中生长,导致矿物

表层发生生物溶蚀、生物磨蚀和生物钻孔作用,加速土壤风化进程;②微生物群体形成的钻孔网络可以增强土壤矿物化学溶蚀的有效表面积并导致矿物颗粒的分解;③微生物分泌的有机酸及微生物呼吸释放的 CO_2 与水结合形成碳酸,从而加速土壤矿物溶解;④微生物生长过程从土壤矿物中摄取营养元素和产生复杂的有机配位体促进矿物元素的释放。Chen 等^[49]综述了地衣对岩石和土壤风化的影响,并指出地衣对风化过程的影响既有物理作用也有化学作用。物理作用主要是通过地衣生长、菌丝伸缩、分泌物的热胀冷缩等促进岩石的物理崩解;化学作用主要是地衣通过分泌各种有机酸,加速土壤矿物的溶解。

3.2.2 植物对土壤风化速率的影响

关于植物,特别是高等植物对土壤风化速率的影响,直到近几十年才得到学者们的关注和研究。Drever^[50]和 Kelly 等^[51]详细论述了植物对土壤风化速率的影响机制。一方面,植物可以通过产生风化剂(碳酸、有机酸等)、吸收养分离子以及形成有机无机复合体直接影响矿物风化速率;另一方面,植物能够通过调节区域水文循环(影响水在矿物表面的停留时间)和改变土壤性质(增加土壤矿物的活性反应面积)间接影响土壤风化过程。Taylor 等^[36]的研究表明,应用元素质量平衡法计算流域土壤风化速率时考虑植物作用得到的结果比忽略植物作用高 4 倍。Drever 等^[52]对瑞士阿尔卑斯山南部地形序列土壤的研究表明,植物作用可以使土壤风化速率增加 7 ~ 8 倍。Bormann 等^[53]研究了美国 Hubbard Brook 流域的土壤风化速率,结果表明,与无植被生长的土壤相比,林地土壤中 Ca 和 Mg 的风化速率分别增加了 10 倍和 8 倍。Moulton 等^[54]利用 2 种方法研究了冰岛西部地区植物对土壤风化速率的影响,指出树木生长使得斜长石和辉石的风化速率分别增加了 2 倍和 10 倍,并且阔叶林区土壤风化速率普遍比针叶林区土壤风化速率高。近年来,一些学者研究表明,植物除了可以吸收养分离子加速土壤风化外,还可以通过根系促进岩石崩解和分泌有机酸加快岩石风化速率^[55]。

3.2.3 动物对土壤风化速率的影响

土壤动物也可以加速矿物风化,目前研究较多的主要是蚯蚓和白蚁。Suzuki 等^[56]用石英和长石颗粒饲养蚯蚓(*Eiseniafoetida*),发现蚓粪中被蚯蚓摄食的矿物颗粒比原先更细更圆,增加了矿物表面积,从而加速其风化。Carpenter 等^[57,58]的研究也表

明,钙长石、黑云母、蛭石和高岭石在蚯蚓的作用下风化速率明显增加,而橄榄石的风化速率不受蚯蚓影响,因此蚯蚓对不同矿物风化的影响程度不同。白蚁和蚯蚓具有相似的生态功能,Jouquet 等^[59]指出白蚁可以加厚黏土层并减少其表面电荷,从而促进黏土矿物的风化。

3.3 母质对土壤风化速率的影响

母质是岩石风化的产物,是土壤形成的物质基础。但与气候因素相比,母质是“钝性”的。作为土壤风化的反应物,母质因其矿物组成和理化性质不同,在其他成土因素的共同作用下影响着风化过程的速度和方向。成土母质大多由岩石风化而来,因此一些学者根据岩性来间接评价母质对土壤风化速率的影响。研究表明,在相同的生物气候带下,蒸发岩的风化速率高于碳酸盐岩,而碳酸盐岩的风化速率又明显高于硅酸盐岩^[60]。不同母质发育而来的土壤在矿物组成方面也具有明显差异,例如,基性岩上发育的土壤富含角闪石、辉石、黑云母等深色矿物,而酸性岩上发育的土壤富含石英、正长石和白云母等浅色矿物;冰碛物和黄土母质上发育的土壤富含水云母和绿泥石等黏土矿物,而河流冲积物和湖积物上发育的土壤富含蒙脱石和水云母等黏土矿物。因此,也可以根据不同矿物的风化速率来间接反映成土母质对土壤风化速率的影响。Jackson 等^[61]研究了不同风化程度的土壤和沉积物中黏土矿物组成的变化规律,结果表明,铁镁质硅酸盐矿物较易风化,而石英的抗风化能力最强。Veldkamp 等^[62]对法国 Allier 地区起源于相同母质的土壤时间序列进行了研究,结果表明,随着易风化石物的减少,母质对土壤风化速率的影响逐渐减弱。Muhs 等^[63]研究表明母质不仅影响土壤风化速率的强度,同时还影响次生黏土矿物的形成速率。

3.4 地形对土壤风化速率的影响

地形是影响土壤与环境之间进行物质交换和能量传递的重要场所,它在土壤风化过程中的作用主要是通过影响其他因素来实现的。例如,地形(海拔高度、坡度和坡向)可改变水热条件和植被状况,从而影响风化过程中物质的迁移和再分配。Johnson 等^[64]研究了美国东北部不同海拔条件下土壤中斜长石的风化速率,结果表明土壤中斜长石的风化速率由坡顶至坡底逐渐增加,这与 Norton 等^[65]在瑞士阿尔卑斯山脉获得的研究结果一致。然而,Nezat 等^[66]和 Jin 等^[67]的研究结果却表明土壤风化速率随着海拔高度的增加而增大。Burke 等^[68]对加利福

尼亚 Point Reyes 地区发育于花岗岩的土壤进行了详细研究,结果表明该地区的土壤风化速率主要受地形因素控制:位于山脊的土壤,其风化速率随着坡度增加而减小,而位于山谷的土壤,其风化速率却沿上坡方向不断增大。由于随着海拔高度的增加,水热条件及植被类型同时发生变化,这些因素的变化会加快或减缓土壤风化进程,因此,单独研究地形对土壤风化速率的影响还值得商榷。

3.5 时间对土壤风化速率的影响

时间和空间是一切事物存在的基本形式。土壤作为历史自然体,不仅随着空间位置的不同而发生变化,而且随着时间的推移而演变。土壤风化速率与时间的定量关系研究始于 19 世纪 50 年代。由于研究初期缺乏实验数据,通常假定土壤风化速率随着时间的增加而线性递减。然而,除了矿物的“谐溶”(congruent dissolution)速率与时间之间符合线性方程外,其他化学风化过程与时间之间的关系几乎都是非线性的^[69]。Bain 等^[70]指出土壤长期风化速率随土壤年龄增加呈指数递减。Taylor 等^[71]计算了美国怀俄明州地区发育于花岗岩冰碛物上的 6 个时间序列的土壤长期风化速率,获得了土壤长期风化速率(RLT)与时间(t)之间的定量关系: $RLT = 215 t^{-0.71}$ (其中 RLT 的单位是 $\text{meq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, t 的单位是 ka)。Taylor 等^[71]指出土壤风化过程中,易风化矿物不断减少以及矿物表面积逐渐增加是风化速率随时间而减小的主要原因。White 等^[72]通过实验方法和野外原位研究相结合,系统分析了土壤中硅酸盐矿物风化速率随时间增加而减小的原因,并指出这是由于矿物风化过程中内部反应条件和外部环境因子发生变化所共同引起的。内部反应条件变化主要包括矿物表面积增加、活性反应表面减少以及黏土矿物增加等。外部环境因子变化主要包括渗透性降低、风化产物增加和离子浓度升高等,从而使得化学风化反应逐渐趋于热力学平衡状态。

3.6 人为活动对土壤风化速率的影响

随着“人类世”(Anthropocene)概念的提出,学者们越来越重视人为活动对土壤乃至地球产生的深远影响。Dudal^[73]将人为活动归为“第六大成土因素”,指出强烈的人类活动介入将导致土壤风化过程被加速或被阻滞、甚至发生逆转。Yaalon 等^[74]认为人为活动除了直接作用于土壤外,主要是通过影响和改变五大成土因素对土壤发生作用。例如,人为活动可以改变土壤的水热组合关系、改变生物种类与数量、改变母质物质组成与性质、改变地形从而

影响水热和物质再分配,这些过程都会对土壤风化速率产生影响。目前关于人为活动影响土壤风化速率的研究主要集中在酸沉降和农业活动 2 个方面。由于近代工业的快速发展,大量化石燃料燃烧排放出的 SO_2 和 NO_x 与大气中的水汽结合生成无机酸,使我国南方降水 pH 甚至低至 4.0 以下^[38]。研究表明,大量干湿沉降进入土壤后会促进盐基离子的淋失和 Al 的活化^[75],并导致土壤风化速率增加^[38]。除了日益增强的酸沉降,农业活动特别是土地利用方式改变对土壤性质和风化速率也具有重要影响。研究表明,在水文和地质条件基本相同的流域中,土地利用方式不同可导致矿物风化速率差异达到 3 倍,并且农业利用比森林利用明显加速水的酸化和土壤风化^[76]。Bayon 等^[77]研究了第四纪以来非洲中部化学风化速率的变化规律,结果表明距今约 3 000 年前化学风化速率急剧增加,并认为这是由于该时期土地利用方式由热带雨林骤变为热带稀树大草原而造成的。

3.7 不同因素对土壤风化速率的综合作用

综上所述,土壤风化速率受自然和人为因素的共同影响,尽管不同因子在土壤风化过程中的作用不同,但都彼此互相联系。土壤风化的物质基础是母质,能量的基本来源是气候,生物通过物质循环和能量交换制约土壤风化过程中的各种物理、化学和生物学反应,地形、时间以及人为活动则影响土壤风化的速度和方向。目前,大多数学者在研究某一主导因子对土壤风化速率的影响时,很少考虑其他环境因子对风化过程的协同作用。Brady 等^[78]阐述了海拔、温度、湿度和地衣对斜长石的溶解速率存在协同作用,但很难定量评价这种协同作用的大小。Gordon^[79]和 Huang 等^[38]利用多元统计分析研究了多个环境变量对土壤风化速率的影响,并建立了多元回归模型,为定量评价多个因子对土壤风化速率的相对贡献提供了参考。

4 结 语

土壤风化速率测定方法及其影响因素研究为更加准确地预测土壤在生态系统中的行为及其在自然和人为作用下的演变趋势奠定了基础。本文从土壤资源退化及其严重的现状出发,回顾了土壤风化速率不同测定方法(实验室模拟研究、模型理论计算、同位素比值、元素损耗和元素输入输出平衡法)及其影响因素(气候、生物、母质、地形、时间和人为活动)研究所取得的进展和其中可能存在的问题,并

在此基础上提出了土壤风化速率研究所面临的机遇和挑战。未来土壤风化速率研究将面临气候变化和人类活动的双重影响,重点应该关注变化中的自然条件和强烈的人为干扰下土壤风化的关键过程、速率及其环境阈值,包括建立风化速率不同测定方法所得结果之间的定量转换关系、揭示风化速率多个影响因素之间的协同效应、模拟和预测气候变化和人类活动双重影响下土壤风化速率的演变趋势,以期为土壤资源的可持续管理和应对全球气候变化提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Hartmann J, West A J, Renforth P, *et al.* Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(2): 113-149.
- [2] Schnoor J L, Stumm W. The role of chemical weathering in the neutralization of acidic deposition [J]. *Swiss Journal of Hydrology*, 1986, 48(2): 171-195.
- [3] Johansson M, Tarvainen T. Estimation of weathering rates for critical load calculations in Finland [J]. *Environmental Geology*, 1997, 29(3/4): 158-164.
- [4] Li L, Du S, Wu L, *et al.* An overview of soil loss tolerance [J]. *Catena*, 2009, 78(2): 93-99.
- [5] Goudie A S, Viles H A. Weathering and the global carbon cycle: Geomorphological perspectives [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(1): 59-71.
- [6] Xu Haijin, Ma Changqian. Review on weathering rates in the crust weathering system [J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(5): 670-678. [续海金, 马昌前. 地壳风化速率研究综述 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 670-678.]
- [7] Lasaga A C. Kinetic Theory in the Earth Sciences [M]. New York: Princeton University Press, 1998: 781-785.
- [8] Fan Houbao, Lin Dexi. Leaching and weathering effects of simulated acid rain on four types of mountain soils in Fujian, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 570-577. [樊后保, 林德喜. 模拟酸雨对福建四种山地土壤的淋溶与风化作用 [J]. 山地学报, 2002, 20(5): 570-577.]
- [9] Feng Zhigang, Ma Qiang, Li Shipeng, *et al.* Leaching experiment for the weathering of carbonate rocks by simulating different climates [J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 31(4): 361-376. [冯志刚, 马强, 李石朋, 等. 模拟不同气候条件下碳酸盐岩风化作用的淋溶实验研究 [J]. 中国岩溶, 2013, 31(4): 361-376.]
- [10] Guicharnaud R, Paton G I. An evaluation of acid deposition on cation leaching and weathering rates of an Andosol and a Cambisol [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1): 279-283.
- [11] Zhang J E, Ouyang Y, Ling D J. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from the Latosol in south China [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2 131-2 137.
- [12] Swoboda-Colberg N G, Drever J I. Mineral dissolution rates in plot-scale field and laboratory experiments [J]. *Chemical Geology*, 1993, 105(1/3): 51-69.
- [13] Velbel M A. Constancy of silicate-mineral weathering-rate ratios between natural and experimental weathering: Implications for hydrologic control of differences in absolute rates [J]. *Chemical Geology*, 1993, 105(1): 89-99.
- [14] Duan Lei, Hao Jiming, Ye Xuemei, *et al.* Study on weathering rate of soil in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, (Suppl. 1): 1-7. [段雷, 郝吉明, 叶雪梅, 等. 中国土壤风化速率研究 [J]. 环境科学学报, 2000, (增刊 1): 1-7.]
- [15] White A F, Brantley S L. The effect of time on the weathering of silicate minerals: Why do weathering rates differ in the laboratory and field? [J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3): 479-506.
- [16] Yang Jinling, Zhang Ganlin. Soil weathering rate and its applications: A review [J]. *Soil*, 2010 (6): 882-888. [杨金玲, 张甘霖. 土壤风化速率研究及其应用 [J]. 土壤, 2010, (6): 882-888.]
- [17] Bain D C, Langan S J. Weathering rates in catchments calculated by different methods and their relationship to acidic inputs [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, 85(3): 1 051-1 056.
- [18] Langan S J, Hodson M E, Bain D C, *et al.* A preliminary review of weathering rates in relation to their method of calculation for acid sensitive soil parent materials [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, 85(3): 1 075-1 081.
- [19] Sverdrup H, Warfvinge P. Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model PROFILE [J]. *Applied Geochemistry*, 1993, 8(3): 273-283.
- [20] Stendahl J, Akselsson C, Melkerud P A, *et al.* Pedon-scale silicate weathering: Comparison of the PROFILE model and the depletion method at 16 forest sites in Sweden [J]. *Geoderma*, 2013, 211: 65-74.
- [21] Cosby B J, Hornberger G M, Galloway J N, *et al.* Modeling the effects of acid deposition: Assessment of a lumped parameter model of soil water and streamwater chemistry [J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(1): 51-63.
- [22] Capo R C, Stewart B W, Chadwick O A. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods [J]. *Geoderma*, 1998, 82(1): 197-225.
- [23] Stevenson E I, Aciego S M, Chutcharavan P, *et al.* Insights into combined radiogenic and stable strontium isotopes as tracers for weathering processes in subglacial environments [J]. *Chemical Geology*, 2016, 429: 33-43, doi:10. 1016/j. chemgeo. 2016. 03. 008.
- [24] Åberg G, Jacks G, Hamilton P J. Weathering rates and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios: An isotopic approach [J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 109(1): 65-78.
- [25] Miller E K, Blum J D, Friedland A J. Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Sr isotopes [J]. *Nature*, 1993, 362: 438-441, doi:10. 1038/362438a0.
- [26] Ma Yingjun, Liu Congqiang. Variations of Sr isotopes during chemical weathering of granitic rocks—Influence of relative min-

- eral weathering rate[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(8): 634-640. [马英军, 刘丛强. 花岗岩化学风化过程中的Sr同位素演化——矿物相对风化速率的影响[J]. 中国科学: D辑, 2001, 31(8): 634-640.]
- [27] Moreira-Nordemann L M. Use of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in measuring chemical weathering rate of rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(1): 103-108.
- [28] Conceição F T, Bonotto D M. Use of U-isotope disequilibrium to evaluate the weathering rate and fertilizer-derived uranium in São Paulo state, Brazil[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(4): 408-418.
- [29] Ma L, Chabaux F, Pelt E, et al. Regolith production rates calculated with uranium-series isotopes at Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 297(1): 211-225.
- [30] Taylor A, Blum J D. Relation between soil age and silicate weathering rates determined from the chemical evolution of a glacial chronosequence[J]. *Geology*, 1995, 23(11): 979-982.
- [31] Land M, Ingri J, Öhlander B. Past and present weathering rates in northern Sweden[J]. *Applied Geochemistry*, 1999, 14(6): 761-774.
- [32] Bain D C, Mellor A, Robertson-Rintoul M S E, et al. Variations in weathering processes and rates with time in a chronosequences of soils from Glen Feshie, Scotland[J]. *Geoderma*, 1993, 57: 275-293.
- [33] Thompson A, Chadwick O A, Boman S, et al. Colloid mobilization during soil iron redox oscillations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(18): 5743-5749.
- [34] Jenny H. Factors of Soil Formation[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1941:52-80.
- [35] Velbel M A, Price J R. Solute geochemical mass-balances and mineral weathering rates in small watersheds: Methodology, recent advances, and future directions[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(8): 1682-1700.
- [36] Taylor A B, Velbel M A. Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge II. Effects of botanical uptake terms[J]. *Geoderma*, 1991, 51(1): 29-50.
- [37] Wakatsuki T, Rasyidin A. Rates of weathering and soil formation[J]. *Geoderma*, 1992, 52(3/4): 251-263.
- [38] Huang L, Zhang G, Yang J. Weathering and soil formation rates based on geochemical mass balances in a small forested watershed under acid precipitation in subtropical China[J]. *Catena*, 2013, 105: 11-20, doi:10.1016/j.catena.2013.01.002.
- [39] Augustin F, Houle D, Gagnon C, et al. Evaluation of three methods for estimating the weathering rates of base cations in forested catchments[J]. *Catena*, 2016, 144, doi:10.1016/j.catena.2016.04.022. 1-10.
- [40] White A F. Quantitative approaches to characterizing natural chemical weathering rates[M] // Brantley S L, Kubicki J D, White A F, eds. Kinetics of Water-Rock Interaction. New York: Springer, 2008:512-531.
- [41] Van't Hoff J H. Etudes de Dynamique Chimique[M]. Amsterdam: Muller, 1884.
- [42] Ramann E. Bodenkunde[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1911.
- [43] White A F, Blum A E. Effects of climate on chemical weathering in watersheds[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9): 1729-1747.
- [44] Stewart B W, Capo R C, Chadwick O A. Effects of rainfall on weathering rate, base cation provenance, and Sr isotope composition of Hawaiian soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(7): 1087-1099.
- [45] Schwartzman D W, Volk T. Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth[J]. *Nature*, 1989, 340:457-460, doi:10.1038/340457a0.
- [46] Müntz A. Sur la decomposition des roches et la formation de la terre arable[J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 1890, 110: 1370-1372.
- [47] Lian Bin, Chen Ye, Zhu Lijun, et al. Progress in the study of the weathering of carbonate rock by microbes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 90-99. [连宾, 陈烨, 朱立军, 等. 微生物对碳酸盐岩的风化作用[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 90-99.]
- [48] Wu Tao, Chen Jun, Lian Bin. Advance in studies on the function of microbes to the weathering of silicate minerals[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(3): 263-268. [吴涛, 陈骏, 连宾. 微生物对硅酸盐矿物风化作用研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(3): 263-268.]
- [49] Chen J, Blume H P, Beyer L. Weathering of rocks induced by lichen colonization—A review[J]. *Catena*, 2000, 39(2): 121-146.
- [50] Drever J I. The effect of land plants on weathering rates of silicate minerals[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(10): 2325-2332.
- [51] Kelly E F, Chadwick O A, Hilinski T E. The effect of plants on mineral weathering[M] // Plant-induced Soil Changes: Processes and Feedbacks. Netherlands: Springer Netherlands, 1998: 21-53.
- [52] Drever J I, Zobrist J. Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(8): 3209-3216.
- [53] Bormann B T, Wang D, Snyder M C, et al. Rapid, plant-induced weathering in an aggrading experimental ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 43(2): 129-155.
- [54] Moulton K L, West J, Berner R A. Solute flux and mineral mass balance approaches to the quantification of plant effects on silicate weathering[J]. *American Journal of Science*, 2000, 300(7): 539-570.
- [55] Li Y, Zhang Q, Wan G, et al. Physical mechanisms of plant roots affecting weathering and leaching of loess soil[J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(9): 1002-1008.
- [56] Suzuki Y, Matsubara T, Hoshino M. Breakdown of mineral

- grains by earthworms and beetle larvae [J]. *Geoderma*, 2003, 112(1): 131-142.
- [57] Carpenter D, Hodson M E, Eggleton P, *et al.* Earthworm induced mineral weathering: Preliminary results [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43: S176-S183, doi:10.1016/j.ejsobi.2007.08.053.
- [58] Carpenter D, Hodson M E, Eggleton P, *et al.* The role of earthworm communities in soil mineral weathering: A field experiment [J]. *Mineralogical Magazine*, 2008, 72(1): 33-36.
- [59] Jouquet P, Mamou L, Lepage M, *et al.* Effect of termites on clay minerals in tropical soils: Fungus-growing termites as weathering agents [J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(4): 521-528.
- [60] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, 287(5): 401-428.
- [61] Jackson M L, Tyler S A, Willis A L, *et al.* Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments. I. Fundamental generalizations [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1948, 52(7): 1 237-1 260.
- [62] Veldkamp A, Feijtel T C. Parent material controlled subsoil weathering in a chronosequence, the Allier terraces, Limagne rift valley, France [J]. *Catena*, 1992, 19(5): 475-489.
- [63] Muhs D R, Bettis E A, Been J, *et al.* Impact of climate and parent material on chemical weathering in loess-derived soils of the Mississippi River Valley [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1 761-1 777.
- [64] Johnson C E, Driscoll C T, Siccama T G, *et al.* Element fluxes and landscape position in a northern hardwood forest watershed ecosystem [J]. *Ecosystems*, 2000, 3(2): 159-184.
- [65] Norton K P, Von Blanckenburg F. Silicate weathering of soil-mantled slopes in an active Alpine landscape [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(18): 5 243-5 258.
- [66] Nezat C A, Blum J D, Klaua A, *et al.* Influence of landscape position and vegetation on long-term weathering rates at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(14): 3 065-3 078.
- [67] Jin L, Ravella R, Ketchum B, *et al.* Mineral weathering and elemental transport during hillslope evolution at the Susquehanna/Shale Hills critical zone observatory [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(13): 3 669-3 691.
- [68] Burke B C, Heimsath A M, White A F. Coupling chemical weathering with soil production across soil-mantled landscapes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(6): 853-873.
- [69] Colman S M. Rock-weathering rates as functions of time [J]. *Quaternary Research*, 1981, 15(3): 250-264.
- [70] Bain D C, Mellor A, Robertson-Rintoul M S E, *et al.* Variations in weathering processes and rates with time in a chronosequence of soils from Glen Feshie, Scotland [J]. *Geoderma*, 1993, 57(3): 275-293.
- [71] Taylor A, Blum J D. Relation between soil age and silicate weathering rates determined from the chemical evolution of a glacial chronosequence [J]. *Geology*, 1995, 23(11): 979-982.
- [72] White A F, Brantley S L. The effect of time on the weathering of silicate minerals: Why do weathering rates differ in the laboratory and field? [J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3): 479-506.
- [73] Dudal R. The sixth factor of soil formation [J]. *Eurasian Soil Science*, 2005, 38(Suppl. 1): S60-S65.
- [74] Yaalon D H, Yaron B. Framework for man-made soil changes-an outline of metapedogenesis [J]. *Soil Science*, 1966, 102(4): 272-277.
- [75] Huang L M, Yang J L, Thompson A, *et al.* Proton production from nitrogen transformation drives stream export of base cations in acid-sensitive forested watersheds [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 348-357, doi:10.1016/j.ecolind.2014.08.028.
- [76] Paces T. Rate constants of dissolution derived from the measurements of mass balance in hydrological catchments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(11): 1 855-1 863.
- [77] Bayon G, Dennielou B, Etoubleau J, *et al.* Intensifying weathering and land use in Iron Age Central Africa [J]. *Science*, 2012, 335(6 073): 1 219-1 222.
- [78] Brady P V, Dorn R I, Brazel A J, *et al.* Direct measurement of the combined effects of lichen, rainfall, and temperature on silicate weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(19): 3 293-3 300.
- [79] Gordon S J. Effect of environmental factors on the chemical weathering of plagioclase in Hawaiian basalt [J]. *Physical Geography*, 2005, 26(1): 69-84.

A Review of The methods and Controls of Soil Weathering Rates^{*}

Huang Laiming^{1,2,4}, Shao Ming'an^{1,2,4*}, Jia Xiaoxu^{1,4}, Zhang Ganlin^{3,4}

(1. *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;*
3. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;* 4. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The study of soil weathering processes, rates and the associated influencing factors is crucial for understanding of the feedbacks between soil and environment, which will provide a basis for predicting soil behavior and evolution trend in the ecosystem under natural and anthropogenic forcings. This is also important for the effective management of soil resources. This article reviewed the methods for measuring soil weathering rates (including simulating leaching experiment, model calculation, isotope technique, element depletion and geochemical mass balance) and the influencing factors (including climate, organism, parent material, relief, time and human activities). In view of the serious degradation of soil resources, we proposed the challenge and opportunity of the research of soil weathering. The future study should focus on the critical processes, rates and the associated environmental thresholds of soil weathering under varying natural conditions and intensive human perturbations, including the establishment of the quantitative relationship between the weathering rates calculated by different methods, the analysis and interpretation of synergistic effects among multiple influencing factors, and the modeling and prediction of changing tendency of weathering rates under the impacts of both climatic changes and human activities, in order to guide the sustainable management of soil resource and mitigation of global change.

Key words: Weathering rate; Geochemical mass balance; Isotope; Environmental threshold; Earth's critical zone.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Water cycle processes and their heterogeneities in the critical zone of the Loess Plateau" (No. 41571130081); the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences "Effect of changing soil properties induced by Grain-for-Green project on water cycle in the semi-arid region of Loess Plateau" (No. A314021402-1602).

First author: Huang Laiming (1984-), male, Anji County, Zhejiang Province, Assistant Professor. Research areas include soil genesis and geochemistry.

E-mail: huanglm@igsrr.ac.cn