

# 关键带土壤演化及其控制机制研究

宋照亮<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 罗维均<sup>2</sup>, 刘涛泽<sup>3</sup>

1. 天津大学 表层地球系统科学研究院, 天津 300072; 2. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学  
国家重点实验室, 贵阳 550081; 3. 贵州民族大学 生态环境工程学院, 贵阳 550025

**摘要:** 地球关键带(简称关键带, Critical Zone)对维系地球生态系统功能和人类生存起着决定性作用。日益严重的水土流失和喀斯特石漠化等生态环境问题主要与人类活动引起的关键带土壤物质迁移和能量交换平衡破坏有关。当前关键带土壤演化研究主要集中在关键带土壤形成机制、成土速率及其控制因素、土壤地表和地下侵蚀速率及其控制因素, 以及土壤演化的控制机制等方面。然而, 针对不同地质、气候和人类活动区域的关键带土壤演化及其模型预测方面的对比研究还比较少。喀斯特地区是我国生态较为脆弱的地区之一, 未来还需要重点针对喀斯特和非喀斯特关键带开展土壤演化及其模型预测的对比研究, 为关键带形成、演化与维持机制研究提供理论基础, 并为水土流失防治和生态恢复提供决策参考。

**关键词:** 喀斯特; 关键带; 土壤; 演化; 土地利用

中图分类号: S151 文章编号: 1007-2802(2020)01-0024-06 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2020.39.008

## Soil Evolution and Its Controlling Mechanisms in A Critical Zone

SONG Zhao-liang<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, LUO Wei-jun<sup>2</sup>, LIU Tao-ze<sup>3</sup>

1. Institute of the Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;  
3. College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

**Abstract:** The Earth's Critical Zone (abbreviated as "the Critical Zone") plays a decisive role in maintaining the function of the Earth's ecosystem and the environment for human survival. Soil, one of the key components of the Critical Zone, is tightly linked to increasingly serious eco-environmental problems since of its Human-induced imbalances of mass transfer and energy exchange, such as soil erosion and karst rocky desertification. Previous studies have provided a wealth of information about (i) the mechanism and the rate of soil formation and their controlling factors; (ii) the rate and determinant factors of soil erosion (via both surface and subsurface runoffs); and (iii) the mechanism and controlling factors of soil evolution. However, there has been very little research on systematically comparing field data and modeling results of the soil formation/evolution over a broad scale of from regional to continental, and much less their relations to local geological and climatic conditions as well as human activities. Karst region is one of the most ecologically fragili area in China. Such study is of particular importance for understanding soil formation, evolution and sustainability in karst and non-karst regions, which provides references in designing and implementing measures to prevent soil erosion and to restore ecosystems in karst regions.

**Key words:** Karst; critical zone; soil; evolution; land use

## 0 引言

地球关键带(简称关键带, Critical Zone)是陆地生物活动的关键地带, 位于陆地表层, 其空间范围

自植被冠层延伸至地下水层, 对维系地球生态系统功能和人类生存起着决定性作用( Brantley et al., 2007; Zhu et al., 2018; Zhang et al., 2019)。深入研究关键带的结构、功能与演化及其控制机制可为

收稿编号: 2019-154 2019-09-04 收到, 2019-11-09 改回

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作研究计划课题(41571130042)和自然科学基金重点项目(41930862)。 <http://www.cnki.net>

第一作者简介: 宋照亮(1978-) 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物地球化学、硅-碳-氮耦合循环、植硅体。 E-mail: zhaoliang.song@tju.edu.cn.

解决当前水土流失、生源要素失衡以及生态系统退化等诸多生态环境问题提供科学参考(Soper et al., 2018; Zhang et al., 2019; 刘鸿雁等, 2019)。

基岩大面积裸露和土地生产力严重下降为主要特征的喀斯特石漠化已成为整个喀斯特地区最为严重的生态问题(王世杰, 2002; 刘丛强等, 2009; 肖建勇等, 2018)。喀斯特地区石漠化问题主要与人类活动引起土壤圈及其与大气圈、生物圈、水圈和岩石圈物质迁移和能量交换平衡发生破坏密切相关(李思亮等, 2019; 张倩等, 2019; Zhang et al., 2019)。要彻底抑制进而修复喀斯特石漠化问题, 必须从关键带系统科学角度, 深入探究喀斯特关键带土壤演化及其与其它圈层的相互作用(Liu et al., 2019; Zhang et al., 2019)。已有研究表明, 由于碳酸盐岩的酸不溶物质含量低, 尽管碳酸盐岩化学风化速率远高于硅酸盐岩(Han and Liu, 2004), 但喀斯特地区风化成土速率(王世杰等, 1999; Xu et al., 2013)一般低于非喀斯特地区(Ma et al., 2010, 2013; West et al., 2013)。在没有受到显著人为干扰情况下, 植被根系对喀斯特地区土壤具有较好的固定作用, 土壤侵蚀速率可能低于成土速率或与成土速率相当。然而, 在人为高强度土地利用背景下, 土壤通过地表侵蚀和地下漏失(如溶洞、落水洞和溶沟等)显著加速(张信宝等, 2007)。因此, 当前喀斯特石漠化主要是由人类不合理利用土地资源引起的。

本文在总结关键带土壤演化与预测模型、风化成土速率及其影响因素、土壤侵蚀速率及其与土地利用/覆盖变化等因素的关系, 以及喀斯特风化成土作用与土壤侵蚀的研究进展的基础上, 指出未来需重点针对喀斯特和非喀斯特关键带开展土壤演化及其模型预测的对比研究, 以为关键带形成、演化与维持机制研究提供理论基础, 并为水土流失防治和生态恢复提供决策参考。

## 1 关键带土壤演化与预测模型

在各种时间和空间尺度上深入理解关键带土壤的演化, 是人类可持续利用关键带服务功能的前提(Anderson et al., 2012; Banwart et al., 2012; Banwart et al., 2019)。关键带土壤过程及其演化是众多地质学家、地球化学家、土壤学家和地理学家们重点关注的研究领域之一(Rasmussen et al., 2011; Anderson et al., 2012; Lugato et al., 2018)。目前, 关键带土壤过程及其演化的研究主要涉及成土物质来源与岩石风化成土过程(Ma et al., 2010,

2013; West et al., 2013; Gu et al., 2019)、土壤侵蚀速率及其控制机制与模型预测(Borrelli et al., 2017; Wang et al., 2017; Lugato et al., 2018)、微生物动态(Zhu et al., 2018)、土壤演化及其人为调控(Banwart et al., 2019)等方面。其中, 岩石风化成土过程和元素生物地球化学循环对土壤侵蚀变化的响应研究受到广泛关注(Borrelli et al., 2017; Wang et al., 2017; Lugato et al., 2018; Gu et al., 2019)。然而, 关于关键带土壤演化研究的核心问题还有待针对不同地质、气候和人类活动区域开展相关的系统研究: (1) 化学、物理和生物风化过程是如何影响关键带土壤的性质与分布的? (2) 关键带土壤属性与演化过程如何响应过去气候和土地利用变化的? (3) 如何在关键带土壤形成及各自然和人为因素相互作用研究的基础上, 建立关键带土壤演化预测模型, 预测未来不同气候和土地利用情景下关键带土壤的流失趋势和恢复能力? 因此, 如何建立一个统一的关键带土壤演化理论框架以及关键带土壤演化预测模型是未来关键带演化研究的重大挑战。

## 2 风化成土速率及其影响因素

风化成土作用是土壤和整个生态系统中矿质养分的最终来源, 在提供植物养分、缓冲土壤和地表水的酸化以及缓解全球气候变化等方面起着重要作用(Gaillardet et al., 1999; Song et al., 2011, 2012)。确定风化速率的方法从原理上可分为两大类, 即实际观测和理论计算(Song et al., 2017)。前者主要包括流域衡算法、剖面质量平衡法和模拟淋溶实验, 后者则包括模型法(如PROFILE模型)和一些经验方法。在目前野外实际岩石风化成土速率研究中, 流域衡算法(Gaillardet et al., 1999; Han and Liu, 2004)、剖面溶质法(White et al., 2009)和剖面固体质量平衡法(Jin et al., 2010; Ma et al., 2010, 2013; West et al., 2013)用得比较普遍。流域衡算法获得的风化速率是短期内流域的平均风化速率(季节性到几十年尺度), 须对所考虑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。剖面溶质法与流域衡算法类似, 但更适用于反映局部风化情况。剖面固体质量平衡法获得的风化速率则是整个土壤剖面形成过程中的长期平均风化速率(万年尺度), 能反映土壤形成的具体情况, 但须有土壤年龄数据作为风化速率计算的基础资料。近年来U系定年法(Ma et al., 2010, 2013)和宇宙成因核素(如 $^{36}\text{Cl}$ 和 $^{10}\text{Be}$ )法(West et al., 2013; Xu et al., 2013)的发展为风化成土速

率的剖面质量平衡法研究提供了强有力的研究工具。

风化成土速率除了与气候、构造和岩石结构等因素有关外 (Lybrand et al., 2011; Brantley et al., 2013; Larsen et al., 2014; Maher and Chamberlain, 2014), 还与土壤侵蚀、矿物组成、酸沉降、植被条件以及人类农业活动等因素有关 (Bain and Langan, 1995; Taylor and Blum, 1995; Gu et al., 2019)。研究 (Gu et al., 2019) 表明, 受岩石微结构等因素控制, 关键带岩石风化速率随着土壤侵蚀速率的提高而提高。理论上, 随着原生矿物的消耗, 长期风化速率会随着土壤年龄的增大而减小 (Taylor and Blum, 1995)。但越来越多的研究表明, 当前风化速率普遍高于长期风化速率, 说明现在风化作用正在加速 (Bain and Langan, 1995; Land et al., 1999)。尽管当前风化速率高于长期风化速率的确切原因还不是很清楚, 但普遍认为与当前气候变化 (Land et al., 1999)、土地利用变化引起的土壤侵蚀加剧 (Borrelli et al., 2017; Wang et al., 2017), 以及工农业活动引起的大气酸沉降和土壤或水体酸化有关 (Bain and Langan, 1995)。进一步区分气候变化与人类活动对风化成土以及大气 CO<sub>2</sub> 消耗速率的影响, 可为工农业活动管理决策提供科学参考。

### 3 土壤侵蚀速率及其与土地利用/覆盖变化等因素的关系

土壤侵蚀是影响人类社会可持续发展的主要生态环境问题之一 (郑粉莉和高学田, 2003), 其方式一般有浅沟侵蚀、细沟侵蚀、薄层水流侵蚀和坡面雨滴溅蚀等。目前, 土壤侵蚀速率的研究方法主要有模型法、GIS 与 RS 结合方法以及放射性同位素示踪 (包括土壤截面示踪和湖泊/水库沉积物示踪) 等方法 (钱庆欢等, 2018), 其中放射性核素 (如 <sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb、<sup>7</sup>Be、<sup>226</sup>Ra 和 <sup>228</sup>Ra 等) 示踪方法已成为国际土壤侵蚀速率研究的热点之一 (Benmansour et al., 2013; Gaspar et al., 2013)。由于不同放射性核素的半衰期不同, 一些放射性核素结合起来可用于示踪不同时间尺度土壤的侵蚀速率。如 <sup>137</sup>Cs 和 <sup>210</sup>Pb 示踪技术可分别进行大约 45 a 和 100 a 以来土壤侵蚀速率的估算和空间分布研究 (Benmansour et al., 2013; Gaspar et al., 2013)。

受气候、地形、母质和植被等自然因素的影响, 不同区域、不同类型土壤侵蚀速率具有显著差异 (Gaspar et al., 2013; Larsen et al., 2014; Borrelli

et al., 2017)。如中低纬度地区和山区土壤侵蚀的速率明显高于其它地区 (Borrelli et al., 2017)。此外, 受土地利用或土地覆盖变化等人为因素的影响, 近 20 年来, 土壤侵蚀速率在美国和中国等国家和地区有明显下降趋势, 而在印度、东南亚和非洲部分地区则有上升趋势 (Benmansour et al., 2013; Borrelli et al., 2017; Wang et al., 2017)。土地利用变化导致的土壤侵蚀速率的变化, 主要与土地利用改变了土壤结构和植被覆盖等因素有关 (Foley et al., 2005; Borrelli et al., 2017)。不合理的土地利用, 可破坏土壤结构和植被覆盖, 从而加剧土壤侵蚀; 反之, 如果有限的土地资源得到优化配置, 则可有效控制土壤侵蚀, 实现土地资源的可持续利用 (Borrelli et al., 2017; Wang et al., 2017)。

### 4 喀斯特风化成土作用与土壤侵蚀

喀斯特地区碳酸盐岩之上发育的红土又称为红钙土或红土 (terra rossa/laterites)。目前, 有关红土形成的机制有三种假说: 溶蚀-残积说、碎屑 (或外来) 沉积说和溶蚀-交代成因说。溶蚀-残积说认为基底碳酸盐岩的原地风化为红土提供了主要的物质来源 (Moresi and Mongelli, 1988; 王世杰等, 1999; Ji et al., 2004)。碎屑 (或外来) 沉积说认为红土的物源是外来物质, 如河流搬运、冲击的碎屑物质、火山灰、风成尘埃等 (符必昌和黄英, 2003; Muhs and Budahn, 2009)。溶蚀-交代说认为“地下水中携带的 Si、Al、Fe 等物质在被溶蚀的矿物颗粒表面形成黏土矿物或直接交代白云石、方解石形成粘土矿物。红土是基岩-土等体积交代的产物” (朱立军和李景阳, 2002; Merino and Banerjee, 2008; Banerjee and Merino, 2011)。在我国西南喀斯特地区, 溶蚀-残积说可较为合理地解释“形成红土需要消耗大量碳酸盐岩”“红土物源”“碳酸盐岩粉化”等问题 (徐则民等, 2005)。然而, 有关西南喀斯特地区成土物源和方式还有待在前人工作的基础上, 利用常量元素、微量元素以及 Sr、Si 同位素、碎屑锆石年代频谱等示踪手段, 进行进一步探讨。

喀斯特石漠化现象是喀斯特地区 (特别是石灰岩地区) 最为严重的生态问题 (王世杰, 2002; 刘鸿雁等, 2019), 其分布以及发生、发展和逆转过程与该地区自然和人为因素不同引起的土壤侵蚀速率、成土速率以及植被结构相对变化有关 (Zhang et al., 2019; 刘鸿雁等, 2019)。

目前尽管从流域离子平衡角度研究喀斯特地区的化学风化速率已有较多报道 (Han and Liu,

2004) ,但针对风化成土剖面直接研究风化成土速率还较少见。初步研究表明,由于碳酸盐岩的酸不溶物质含量低,尽管碳酸盐岩化学风化速率远高于硅酸盐岩(Han and Liu, 2004),但喀斯特地区的风化成土速率(王世杰等, 1999; Xu et al., 2013)一般低于非喀斯特地区(Ma et al., 2010, 2013; West et al., 2013)。王世杰等(1999)对形成1 m厚土层所需溶蚀碳酸盐岩厚度和时间的研究表明,石灰岩因泥质含量较高(11%~39%),形成1 m厚的残积土需溶蚀2~5 m碳酸盐岩和28~84 ka;白云岩因所含的泥质含量差别较大(平坝剖面为0.625%,新蒲剖面为4%),形成1 m残积土所需溶蚀的碳酸盐岩层厚度和时间差别极大,分别为13 m和220 ka与79 m和790 ka。Xu等(2013)利用<sup>36</sup>Cl测定贵州碳酸盐岩溶蚀速率的研究(图1)表明,碳酸盐岩溶蚀速率与气温有较弱的负相关性,而与降水的相关性不显著。然而,<sup>36</sup>Cl代表的碳酸盐岩溶蚀速率的控制机制,还有待深入研究。另外,<sup>36</sup>Cl代表的碳酸盐岩溶蚀速率与风化成土速率的关系有待利用新的同位素(如U系核素)进一步探讨。

对我国西南喀斯特流域水化学组分平衡计算结果(白占国和万国江, 1998)表明,流域总侵蚀速率为0.02 g/(cm<sup>2</sup>·a),即约0.08 mm/a,其中化学侵蚀约占4/5,物理侵蚀约占1/5。与其它地区不同,由于复杂的地上和地下二元地貌结构,喀斯特地区土壤侵蚀方式不仅有地面流失,还有地下漏失(张信宝等, 2007)。在裂隙、溶沟、溶槽和洞穴发育的纯碳酸盐岩区,地下漏失甚至是地表流失的4倍以上。不合理的土地利用会加剧土壤侵蚀,特别是地下漏失(张信宝等, 2007)。然而,地下漏失在喀斯特山地土壤侵蚀中的重要性,以及人类活动对地下

漏失的影响程度还不清楚,当前喀斯特石漠化地区土壤侵蚀防治的一般模式和措施,难以防治土壤的地下漏失,因而难以从根本上根治石漠化这一“地球癌症”。

### 5 结语与展望

目前,国际上有关关键带土壤形成过程及速率已有较多研究。风化成土速率除了与气候、构造和地形等因素有关外,还与矿物组成、酸沉降、植被条件以及人类活动等因素有关。土壤侵蚀速率除了与气候、地形、母质和植被等自然因素有关外,还明显受到土地利用/覆盖变化等人为因素的影响。喀斯特石漠化的分布以及发生、发展和逆转过程与该地区自然和人为因素不同引起的土壤侵蚀速率以及成土速率相对变化有关。在上述分析的基础上,本文针对喀斯特地区提出两个假说:(1)土壤演化的岩性与生物控制假说。岩性(如碳酸盐岩纯度)决定了关键带风化成土作用的程度、速率以及土壤物质的来源和演化方式;通过优化土地利用管理(如深根植物种植),优化植被覆盖,提高植物生产力,可加速风化成土作用,减少土壤侵蚀(特别是地下漏失),加快喀斯特生态系统恢复进程。(2)土壤侵蚀的通道网控制假说。亚表面通道网是喀斯特地区土壤侵蚀的重要途径,关键带亚表面通道网的发育不仅影响土壤地下侵蚀,还可通过改变地表通道网和地表径流,影响土壤地表侵蚀。今后有必要通过不同岩性、地形、植被和人类干扰条件下喀斯特和非喀斯特关键带土壤形成与侵蚀研究,探索土壤形成机制与速率、地表和地下侵蚀速率的关键控制因素,揭示不同岩性、地形和土地利用历史下土壤演化的风化-侵蚀控制机制,预测未来不同土地

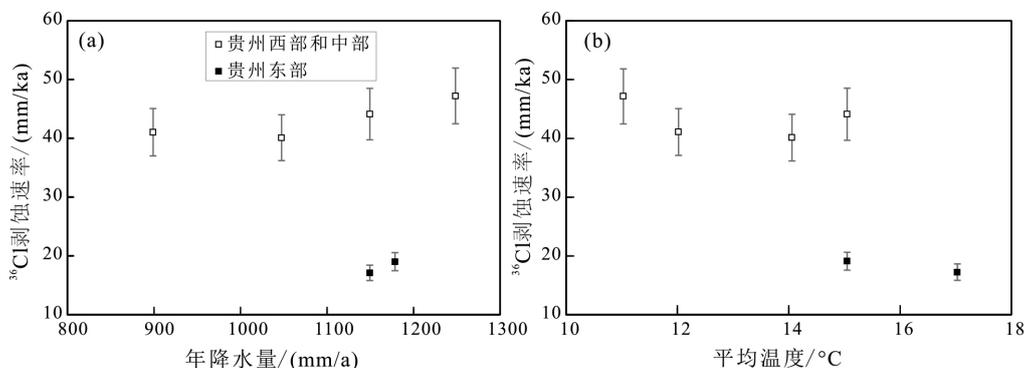


图1 贵州喀斯特(贵州中西部)和非喀斯特地区(贵州东部)<sup>36</sup>Cl指示的岩石溶蚀速率与降水(a)和气温(b)的关系

Fig.1 The correlations of <sup>36</sup>Cl denudation rates in karst and non-karst regions of Guizhou Province with

利用情景下土壤的流失趋势和恢复能力,进而检验土壤演化的岩性-生物控制假说以及土壤侵蚀的通道网控制假说。

#### 参考文献(References):

- Anderson S P, Anderson R S, Tucker G E. 2012. Landscape scale linkages in critical zone evolution. *Comptes Rendus Geoscience*, 344( 11-12): 586-596
- Bain D C, Langan S J. 1995. Weathering rates in catchments calculated by different methods and their relationship to acidic inputs. *Water, Air, and Soil Pollution*, 85( 3): 1051-1056
- Banerjee A, Merino E. 2011. Terra Rossa genesis by replacement of limestone by kaolinite. III. Dynamic quantitative model. *The Journal of Geology*, 119( 3): 259-274
- Banwart S A, Nikolaidis N P, Zhu Y G, Peacock C L, Sparks D L. 2019. Soil functions: connecting earth's critical zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47: 333-359
- Banwart S, Menon M, Bernasconi S M, Bloem J, Blum W E H, de Souza D M, Davidsdotir B, Duffy C, Lair G J, Kram P, Lamacova A, Lundin L, Nikolaidis N P, Novak M, Panagos P, Ragnarsdottir K V, Reynolds B, Robinson D, Rousseva S, De Ruiter P, van Gaans P, Weng L P, White T, Zhang B. 2012. Soil processes and functions across an international network of Critical Zone Observatories: Introduction to experimental methods and initial results. *Comptes Rendus Geoscience*, 344( 11-12): 758-772
- Benmansour M, Mabit L, Nouira A, Moussadek R, Bouksirate H, Duchemin M, Benkdad A. 2013. Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ . *Journal of Environmental Radioactivity*, 115: 97-106
- Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Van Oost K, Montanarella L, Panagos P. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8: 2013
- Brantley S L, Goldhaber M B, Ragnarsdottir K V. 2007. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. *Elements*, 3( 5): 307-314
- Brantley S L, Holleran M E, Jin L X, Bazilevskaya E. 2013. Probing deep weathering in the Shale Hills Critical Zone Observatory, Pennsylvania ( USA ): the hypothesis of nested chemical reaction fronts in the subsurface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38( 11): 1280-1298
- Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309( 5734): 570-574
- Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, Allègre C J. 1999. Global silicate weathering and  $\text{CO}_2$  consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, 159( 1-4): 3-30
- Gaspar I, Navas A, Walling D E, Machin J, Arozamena J G. 2013. Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  to assess soil redistribution on slopes at different temporal scales. *Catena*, 102: 46-54
- Gu X, Rempe D M, Dietrich W E, West A J, Lin T C, Jin L, Brantley S L. 2019. Chemical reactions, porosity, and microfracturing in shale during weathering: the effect of erosion rate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.09.044>
- Han G L, Liu C Q. 2004. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China. *Chemical Geology*, 204( 1-2): 1-21
- Ji H B, Wang S J, Ouyang Z Y, Zhang S, Sun C X, Liu X M, Zhou D Q. 2004. Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan-Guizhou Plateau: I. The formation of the Pingba profile. *Chemical Geology*, 203( 1-2): 1-27
- Jin L X, Ravella R, Ketchum B, Bierman P R, Heaney P, White T, Brantley S L. 2010. Mineral weathering and elemental transport during hillslope evolution at the Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74( 13): 3669-3691
- Land M, Ingri J, Öhlander B. 1999. Past and present weathering rates in northern Sweden. *Applied Geochemistry*, 14( 6): 761-774
- Larsen I J, Almond P C, Eger A, Stone J O, Montgomery D R, Malcolm B. 2014. Rapid soil production and weathering in the Southern Alps, New Zealand. *Science*, 343( 6171): 637-640
- Liu H Y, Jiang Z H, Dai J X, Wu X C, Peng J, Wang H Y, Meersmans J, Green S M, Quine T A. 2019. Rock crevices determine woody and herbaceous plant cover in the karst critical zone. *Science China Earth Sciences*, 62: 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9328-3>
- Lugato E, Smith P, Borrelli P, Panagos P, Ballabio C, Orgiazzi A, Fernandez-Ugalde O, Montanarella L, Jones A. 2018. Soil erosion is unlikely to drive a future carbon sink in Europe. *Science Advances*, 4( 11): eaau3523
- Lybrand R, Rasmussen C, Jardine A, Troch P, Chorover J. 2011. The effects of climate and landscape position on chemical denudation and mineral transformation in the Santa Catalina mountain critical zone observatory. *Applied Geochemistry*, 26( S1): S80-S84
- Ma L, Chabaux F, Pelt E, Blaes E, Jin L X, Brantley S. 2010. Regolith production rates calculated with uranium-series isotopes at Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory. *Earth and Planetary Science Letters*, 297( 1-2): 211-225
- Ma L, Chabaux F, West N, Kirby E, Jin L X, Brantley S. 2013. Regolith production and transport in the Susquehanna Shale Hills Critical Zone Observatory, Part I: Insights from U-series isotopes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118( 2): 722-740
- Maher K, Chamberlain C P. 2014. Hydrologic regulation of chemical weathering and the geologic carbon cycle. *Science*, 343( 6178): 1502-1504
- Merino E, Banerjee A. 2008. Terra rossa genesis, implications for karst, and eolian dust: a geodynamic thread. *The Journal of Geology*, 116( 1): 62-75
- Moresi M, Mongelli G. 1988. The relation between the terra rossa and the carbonate-free residue of the underlying limestones and dolostones in Apulia, Italy. *Clay Minerals*, 23( 4): 439-446

- Muhs D R, Budahn J R. 2009. Geochemical evidence for African dust and volcanic ash inputs to terra rossa soils on carbonate reef terraces, northern Jamaica, West Indies. *Quaternary International*, 196(1-2): 13-35
- Rasmussen C, Troch P A, Chorover J, Brooks P, Pelletier J, Huxman P T E. 2011. An open system framework for integrating critical zone structure and function. *Biogeochemistry*, 102(1-3): 15-29
- Song X W, Gao Y, Wen X F, Guo D L, Yu G R, He N P, Zhang J Z. 2017. Carbon sequestration potential and its eco-service function in the karst area, China. *Journal of Geographical Sciences*, 27(8): 967-980
- Song Z L, Wang H L, Strong P J, Li Z M, Jiang P K. 2012. Plant impact on the coupled terrestrial biogeochemical cycles of silicon and carbon: Implications for biogeochemical carbon sequestration. *Earth-Science Reviews*, 115(4): 319-331
- Song Z L, Zhao S L, Zhang Y Z, Hu G L, Cao Z H, Wong M H. 2011. Plant impact on CO<sub>2</sub> consumption by silicate weathering: the role of bamboo. *The Botanical Review*, 77(3): 208-213
- Soper F M, Chamberlain S D, Crumsey J M, Gregor S, Derry L A, Sparks J P. 2018. Biological cycling of mineral nutrients in a temperate forested shale catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(10): 3204-3215
- Taylor A, Blum J D. 1995. Relation between soil age and silicate weathering rates determined from the chemical evolution of a glacial chronosequence. *Geology*, 23(11): 979-982
- Wang Z G, Hoffmann T, Six J, Kaplan J O, Govers G, Doetterl S, Van Oost K. 2017. Human-induced erosion has offset one-third of carbon emissions from land cover change. *Nature Climate Change*, 7(5): 345-350
- West N, Kirby E, Bierman P, Slingerland R, Ma L, Rood D, Brantley S. 2013. Regolith production and transport at the Susquehanna Shale Hills Critical Zone Observatory, part 2: insights from meteoric <sup>10</sup>Be. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3): 1877-1896
- White A F, Schulz M S, Stonestrom D A, Vivit D V, Fitzpatrick J, Bullen T D, Maher K, Blum A E. 2009. Chemical weathering of a marine terrace chronosequence, Santa Cruz, California. Part II: Solute profiles, gradients and the comparisons of contemporary and long-term weathering rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(10): 2769-2803
- Xu S, Liu C Q, Freeman S, Lang Y C, Schnabel C, Tu C L, Wilcken K, Zhao Z Q. 2013. *In-situ* cosmogenic <sup>36</sup>Cl denudation rates of carbonates in Guizhou karst area. *Chinese Science Bulletin*, 58(20): 2473-2479
- Zhang G L, Zhu Y G, Shao M A. 2019. Understanding sustainability of soil and water resources in a critical zone perspective. *Science China Earth Sciences*, 62: 1-3. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9368-7>
- Zhu Y G, Gillings M, Simonet P, Stekel D, Banwart S, Penuelas J. 2018. Human dissemination of genes and microorganisms in Earth's Critical Zone. *Global Change Biology*, 24(4): 1488-1499
- 白占国, 万国江. 1998. 贵州碳酸盐岩区域的侵蚀速率及环境效应研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 4(1): 1-7, 46
- 符必昌, 黄英. 2003. 试论碳酸盐岩上覆红土的形成模式及演化趋势. *地质科学*, 38(1): 128-136
- 李思亮, 钟君, 李彩, 刘静, 岳甫均, 任奕蒙, 徐森. 2019. 中国西南河流碳、氮运移机制及其对水文条件变化的响应: 以西江为例. *矿物岩石地球化学通报*, 38(3): 499-507, 438
- 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法. 2009. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势. *地学前缘*, 16(6): 1-12
- 刘鸿雁, 蒋子涵, 戴景钰, 吴秀臣, 彭建, 王红亚, Meersmans J, Green S M, Quine T A. 2019. 岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖. *中国科学(D辑)*: 1-8 [2019-10-23]. [doi.org/10.1360/N072018-00184](https://doi.org/10.1360/N072018-00184)
- 钱庆欢, 王世杰, 白晓永, 周德全, 田义超, 李琴, 吴路华, 肖建勇, 曾成, 陈飞. 2018. 基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究. *地理学报*, 73(11): 2135-2149
- 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 周德全, 郑乐平, 黎廷宇. 1999. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究. *中国科学(D辑)*, 29(5): 441-449
- 王世杰. 2002. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. *中国岩溶*, 21(2): 101-105
- 肖建勇, 王世杰, 白晓永, 周德全, 田义超, 李琴, 吴路华, 钱庆欢, 陈飞, 曾成. 2018. 喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素. *生态学报*, 38(24): 8799-8812
- 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 费维水. 2005. 中国南方碳酸盐岩上覆红土形成机制研究进展. *地球与环境*, 33(4): 29-36
- 张倩, 韩贵琳, 柳满, 阳昆桦, 刘强. 2019. 贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素. *生态学杂志*, 38(2): 321-328
- 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 2007. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. *地球与环境*, 35(3): 202-206
- 郑莉莉, 高学田. 2003. 坡面土壤侵蚀过程研究进展. *地理科学*, 23(2): 230-235
- 朱立军, 李景阳. 2002. 碳酸盐岩风化成土的交代作用机理: I. 矿物与微结构证据. *贵州工业大学学报(自然科学版)*, 31(2): 44-47

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 肖保华)

### III

《环境化学》和《分析仪器》编委 《化学通报》副主编。



罗孝俊,男,中国科学院广州地球化学研究所研究员,博士生导师。从事环境中毒害性有机污染物的研究。包括痕量毒害性有机污染物的分析方法、时空分布、生物富集与生物转化等。近年来的研究系统的揭示了多溴联苯醚、得克隆等在水陆生生物上的差异性富集及其机制、发展建立了生物及环境介质中持久性有机污染物的单体/手性异构体稳定同位素分析方法,并用该分法示踪了多氯联苯、多溴联苯醚在生物中的差异性生物转化过程,量化了上述化合物的生物转化速率及生物转化对生物放大的影响。



宋照亮,男,博士,天津大学,教授,博士生导师。主要在硅-碳循环耦合机制、风化碳汇、植硅体碳汇以及硅生物地球化学循环等方面取得了系列创新性研究成果,包括完善了陆地硅-碳耦合生物地球化学循环及其调控理论;

建立了区域和全球尺度植硅体碳汇的计量方法并初步揭示了典型陆地生态系统植硅体碳汇的潜力和调控机制;阐明了森林和草地等生态系统硅酸盐风化碳汇与硅循环的植物调控机制。这些成果为完善全球碳生物地球化学循环模式提供了理论依据。获国家自然科学基金优秀青年科学基金资助;是刘东生青年地球科学家奖获得者。



孟博,男,中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室研究员,博士生导师。主要从事敏感生态系统汞的生物地球化学研究。近年来对水库生态系统和稻田生态系统汞的生物地球

化学循环开展了系统的研究工作,发现了我国新建水库不存在甲基汞污染问题,深刻剖析了我国水库汞的循环演化模式不同于北美、北欧的原因,建立了我国水库汞的生物地球化学循环演化的新模式;明确了稻田土壤汞的甲基化过程及影响因素,解析了稻米中无机汞和甲基汞的来源,揭示了水稻对无机汞和甲基汞的富集和转运机制。



郑晓波,男,华南农业大学副教授,硕士生导师。主要从事陆地生态系统中环境有机污染物的生物富集和生物放大研究。近年来的研究主要揭示鸟类食性和栖息地等生态学因素和污染物的物理

化学性质对鸟类富集污染物的影响,阐明了家禽(鸡)全生命周期中有机污染物的迁移、传递、和生物代谢规律。



张文倩,女,中国科学院化学研究所在读博士研究生。主要从事大气气溶胶和灰霾成因研究,目前主要从事大气含氮物种亚硝酸的生消机制以及大气氧化性的研究。