

森林流域营养离子循环的锶同位素示踪

郑厚义^{1,2}, 王中良¹, 谌书^{1,2}

1. 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 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

摘要: 大气输入与岩石风化是森林系统 K、Na、Ca、Mg 等营养离子的主要来源, 了解二者的输入比率及转化是研究森林流域内物质循环过程的关键。Sr 同位素作为 Ca 等阳离子的有效“示踪剂”, 已广泛应用于流域内 Ca 等阳离子来源及其在系统内循环的研究。本文着重介绍了 Sr 同位素定量模型的建立及其在森林流域营养离子来源识别和循环通量计算研究中的应用。

关键词: 森林流域; Sr 同位素; 定量模型

森林是陆地生态系统的重要组成部分。然而, 当前世界上很多森林都受到不同程度人为因素的影响, 特别是受到大气污染和酸沉降的影响。长期的酸沉降会导致森林土壤中 K、Na、Ca、Mg 等营养离子的亏损, 最终引起植物营养失衡, 导致生态系统的严重恶化^[1~3]。因此, 研究森林流域的营养离子的来源和循环规律, 是正确评估森林生态系统对大气沉降等外界因素影响的响应、维护生态系统平衡的基础^[3]。

水文、化学方法与质量平衡计算相结合是森林流域物质循环研究的主要手段^[3]。但当系统中的营养离子(例如 Ca)有多种可能来源时, 该方法常常无法很好地判别其来源与循环过程。研究证明, Sr 同位素是辨识流域内 Ca 等营养离子来源、研究流域内物质循环规律的有效工具^[3~7]。

Sr 同位素有很好的示踪作用, 已广泛应用于大陆-河流-海洋系统、大陆-河流-河口系统、岩石-土壤-植被-大气系统的研究。

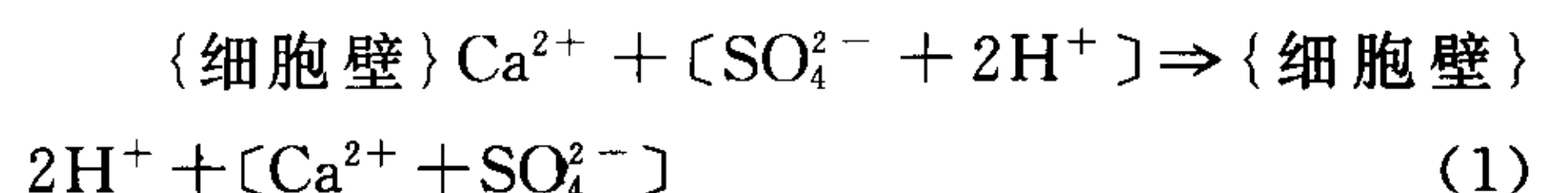
将大气沉降-植物-岩石-土壤-水体作为一个完整的系统, 建立一定的模型来定量的探讨营养离子在整个系统中的循环, 是研究森林流域营养离子循环的趋势^[4~6]。目前应用于流域营养离子循环的模式主要有稳态 PROFILE 模型、动态 MAGIC 模型和 Sr 同位素的定量模型等。前两种模型主要是应用于流域酸沉降负荷的研究, 需要根据流域情况设定参数, 可能会给计算造成较大的偏差, 而且当某一

特定元素有多种可能来源时, 常常无法给出一个确切的答案。而借助于 Sr 同位素的示踪作用则可以测算这些循环过程的通量, 在不同尺度上建立起森林流域内 Ca(Sr) 等营养离子循环的生物地球化学模型, 进一步了解生态系统的结构和功能。

(1) 森林流域的营养离子循环: 大气输入-植物-土壤(岩石)-水体构成了森林流域的营养离子循环体系。

岩石风化和大气输入是森林生态系统中阳离子的两个主要来源^[4,8]。因此, 明确岩石风化和大气沉降物的输入比率及转化过程是流域内物质循环的质量平衡研究的关键。大气输入森林流域的不同营养离子间的比例, 可能影响到以大气沉降为其主要来源的一些生态系统的正常功能。

从森林流域的大气降水到径流水的水质变化, 受蒸发作用、树冠层的交换和淋洗、土壤有机质的矿化和硝化作用、土壤矿物质的风化作用, 以及深层土壤的反硝化作用等因素的控制^[2]。Draaijer 等指出雨水穿过冠层时会发生离子交换, 雨水中 H⁺ 被树冠吸收, 树叶中的 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺ 被部分淋洗:

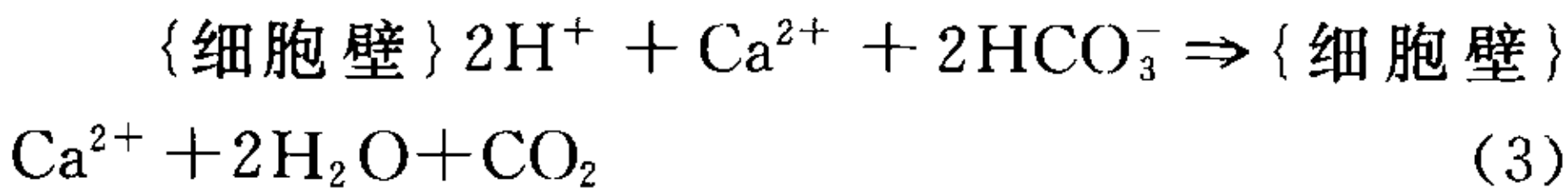


林冠淋洗下来的物质进入土壤(土壤溶液)后, 在根际与植被发生离子交换:





再经过植被的蒸腾作用等一系列生物过程, 营养离子在植被内形成循环:



林登秋等对台湾福山地区研究发现, 林冠盐基阳离子的淋溶与降雨量及雨水之酸度均呈正相关, 显示阳离子交换为林冠缓冲酸沉降的重要方式。

比利时森林的研究^[7]结果表明, 大气输入是 Ca 等营养离子的主要来源, 酸性土壤上的生态环境对大气环境的化学变化反应敏感。锶同位素计算结果显示, 该地区流域河水中高达 26% 的 Ca 来自大气沉降。随着土壤风化程度的不断加强, 热带雨林生态系统中营养离子由主要来自基岩、土壤风化逐渐过渡到以大气沉降为主。对缺乏营养离子的敏感性土壤来说, 大气沉降来源的 Ca 甚至占离子的一半以上。当然, 严重的酸沉降也会导致土壤中易交换态阳离子过快流失^[9]。

(2) 锶同位素示踪原理: 由于 Sr 和 Ca 地球化学性质相似, 而且不同来源的 Sr 的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值不一; 根据各端员锶同位素比值, 结合同位素混合模型和化学计算, 可以定量估算土壤、水体和植被中不同来源离子的比例和通量, 所以, 锶同位素常被用来示踪流域内 Ca 等营养离子的来源和循环^[3]。1983 年 Gosz 等首先将 Sr 同位素用于生态系统营养元素来源的辨识, 锶同位素已发展成为研究流域物质循环的重要手段。

在知道每个端员组分和混合物锶同位素的情况下, 两组分混合物中各端员组分对分馏的贡献可以根据同位素混合方程求得:

$$\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = [(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_{\text{样品}} / (\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_{\text{标样}} - 1] \times 10^3。$$

一般选海水为标样, 现代海水中锶的平均浓度大约为 8 mg/L, 锶同位素比值为 0.7093 ± 0.0005^[10]。端员组分 A 对 A 和 B 的混合物(M)的分馏贡献 x 为:

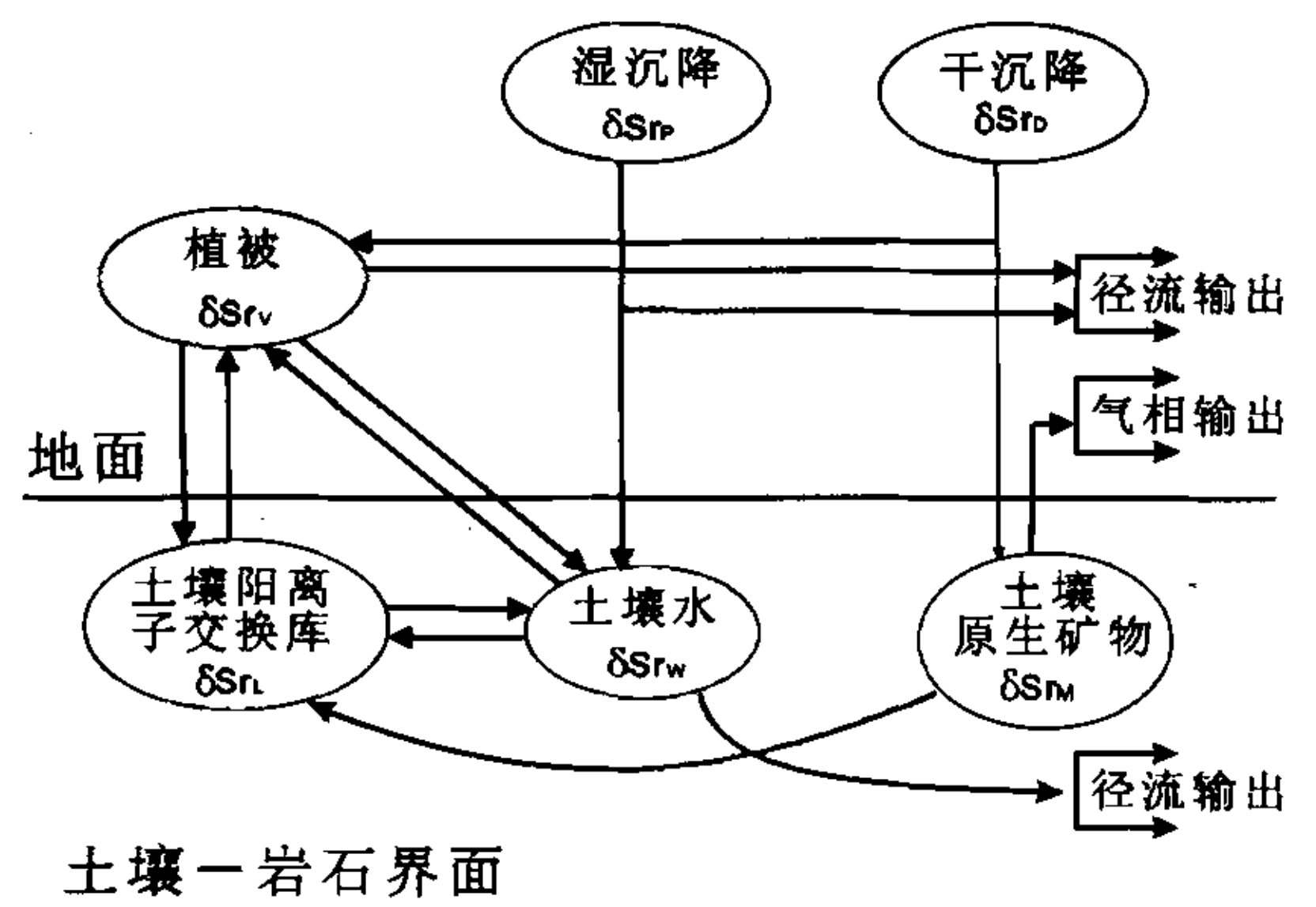
$$x = (\Delta^{87}\text{Sr}_M - \Delta^{87}\text{Sr}_A) / (\Delta^{87}\text{Sr}_A - \Delta^{87}\text{Sr}_B)。$$

(3) 锶同位素定量模型的建立: 首先要区分森林流域可能的不同的营养离子库; 确定不同的端员。一般可以分为大气沉降物、植被、土壤、岩石、地表(下)水等不同的营养离子库。

测定大气沉降物、地表(下)水、土壤、岩石等的营养离子(包括 Sr)的含量及相对应的锶同位素比值。计算大气沉降输入土壤和水体的营养离子通量; 测算土壤离子交换库输入水体的营养离子通量,

测算雨水与植被的离子交换通量, 估计植被从土壤中吸收离子通量, 根据地表(下)水计算输出流域的营养离子通量。

依据化学质量平衡原理和锶同位素混合原理, 将上述生态系统内各离子储库间的营养离子迁移通量结合输入输出系统的离子通量, 即可建立简单的森林流域营养离子循环的定量模型(图 1)。图 1 中箭头代表营养离子在各离子储库间的迁移或输入输出生态系统, 各迁移过程通量的准确测算建立在上述定量地球化学模型的基础之上。稳态条件下, 从土壤剖面中流失的活性营养离子的通量为通过大气沉降、矿物风化及生物循环加入土壤的营养离子通量的综合; 但是, 长期的酸沉降可能破坏这种平衡状态。



箭头代表营养离子在各离子储库间的迁移或输入、输出生态系统; δSr_P 、 δSr_D 、 δSr_V 、 δSr_I 、 δSr_W 和 δSr_M 分别代表湿沉降、干沉降、植被、土壤阳离子交换库、土壤水和土壤原生矿物离子库的锶同位素比值

图 1 土壤-植被-大气生态系统内营养离子(Sr)循环的地球化学模型

综上所述, 锶同位素在森林流域系统营养离子循环研究中有重要的指示作用。这一循环是一个复杂的物理和化学过程, 目前的研究方法和技术手段还有许多不完善之处。要建立的模型更客观地反映离子循环规律模型, 除了必须精确确定不同的端员值外, 还需深入探讨 Sr 与 Ca 等营养离子在循环过程中行为的差异。

近年来, 我国南方的大片区域受到严重的酸沉降威胁, 频繁出现土壤酸化和森林生长衰退事件, 而高盐基阳离子含量又是该地区大气沉降的重要特征^[1,2,11,12]。这说明在碳酸盐岩广泛发育地区, 研究酸沉降影响下的森林流域内阳离子循环的重要性。应该大力加强利用 Sr 同位素示踪手段对森林流域营养离子循环的研究。

参考文献:

- [1] 冯宗炜,主编. 酸雨对生态系统的影响——西南地区酸雨研究[M]. 北京:中国科学技术出版社,1993. 71—108.
- [2] 冯延文,冯宗炜,小仓纪雄,黄益宗. 北京郊外森林小流域的大气降水的水质及其变化过程[J]. 环境科学进展,1999,7(4): 112—119.
- [3] 马英军,刘丛强. 生态系统营养离子循环及水化学演化的锶同位素示踪[J]. 地球科学进展,1998,14(4):377—383.
- [4] Stewart B W, Capo R C. Quantitative strontium isotope models for weathering and biogeochemical cycling[J]. Geoderma, 1998, 82: 173—195.
- [5] Likens G E, Driscoll C T, Buso D C. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook [J]. Biogeochemistry,1998, 41:89—173.
- [6] Capo R C, Stewart B W, Chadwick O A. Strontium isotope as tracers of ecosystem processes: Theory and methods [J]. Geoderma,1998, 82: 197—225.
- [7] Dtouet Th, Herbauts J, Gruber W, Demaiffe D. Strontium isotope composition as a tracer of calcium sources in tow forest ecosystems in Belgium[J]. Geoderma, 2005, 126: 203—223.
- [8] Probst A, Gh'mari A, Aubert D, Fritz B, Mcnutt R. Strontium as a tracer of weathering processes in a silicate catchment by acid atmospheric inputs[J]. Chemical Geology, 2000, 170: 203—219.
- [9] Kennedy M J, Chadwick O A, Vitousek P M. Changing sources of base cations during ecosystem development [J]. Geology, 1998, 26(11):1015—1018.
- [10] 福尔 G, 鲍威尔 J L, 著. 中国科学院贵阳地球化学所译. 锶同位素地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1975.
- [11] Zeng G M, Zhang G, Huang G H, Jiang Y M, H L Liu. Exchange of Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^{+} and uptake of H^{+} , NH_4^{+} for the subtropical forest canopies influenced by acid rain in Shaoshan forest located in central South China[J]. Plant Science, 2005, 168:259—266.
- [12] Larssen T, Carmichael G R. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition[J]. Environmental Pollution, 2000, 110: 89—102.