

后生地球化学

[苏] A. И. 彼列尔曼 著



后 生 地 球 化 学

〔苏〕 A. И. 彼列尔曼著

龚子同 徐 琪 刘良梧 译
刘多森 戴昌达

科 学 出 版 社

1 9 7 5

内 容 简 介

本书内容可分成三部分：第一部分着重叙述与后生地球化学有关的物理化学原理；第二部分介绍表生带自然体的地球化学类型以及表生带中各种后生地球化学过程；第三部分介绍地球化学盆的概念以及后生过程在地质历史中的发展。

本书可供生物地球化学工作者、土壤工作者、地理工作者和有关高等院校师生参考。

А. И. Перельман

ГЕОХИМИЯ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

(Зона Гипергенеза)

Издательство Недра

Москва 1965

后 生 地 球 化 学

[苏] А. И. 彼列尔曼著

龚予同 徐 琪 刘良梧 译
刘多森 戴昌达

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

保定市印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1975年5月第一版 开本：787×1092 1/32

1975年5月第一次印刷 印张：9 11/16 插页：1

印数：0001—3,520 字数：220,000

统一书号：13031·112

本社书号：226·13—12

定价：1.05 元

译者的话

后生地球化学是一门年青的地球化学分支，它运用近代物理化学的成就，研究和阐明地壳表层的各种后生过程，对于了解地壳表层化学元素的迁移和累积规律、外成矿床的形成以及选择找矿方法等，都有一定的指导意义；对于土壤学、地理学和地质学的研究，也有一定的参考价值。

近年来，后生地球化学这门学科有了较迅速的发展。遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译了《后生地球化学》这本书，供有关专业工作者参考。

在翻译过程中，我们对原著中的某些欠缺和错误进行了注释或更正。

由于时间匆促，加之我们水平有限，错误在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

引言	1
第一章 生命物质的地球化学作用 (生物迁移- 生物作用)	4
生命物质的形成	5
有机质的分解	11
化学元素的生物循环	13
地质历史中的生命物质	15
第二章 决定物理和化学迁移的元素地球化学 参数	20
化学键类型与矿物晶格结构	20
原子价	25
离子和原子的大小	28
类质同晶	31
离子势	32
溶解度	33
第三章 地球化学中的质量作用定律	38
水的解离常数与 pH	39
酸的解离常数	47
络离子	50
不解离的分子	53
溶度积	54
天然水的离子强度	59
天然水中元素浓度对矿物形成的作用	62
第四章 表生迁移的能量分析	64

化学亲合力	68
氧化-还原反应	86
硫化物矿石的电化学溶解作用	92
矿物和化合物的稳定区域	94
Ле Шателье 原理	98
A. E. Ферсман 的地质能量理论	100
化学反应的抑制原理	103
第五章 胶体迁移	108
胶体在表生带的分布	108
物质以胶体状态的迁移作用	109
吸着作用	110
胶体矿物主要类型	114
第六章 表生带化学元素的存在形态	118
第七章 表生带自然体	123
土壤	123
风化壳	127
地表水和潜水	131
地球化学景观	132
深变质作用亚带的含水层	132
风化作用和胶结作用	138
后生带性	139
第八章 决定表生带自然体分布的因素	141
气候	141
地带性	142
地质构造	152
第九章 表生带后生过程的地球化学分类	157
标型元素	157
空气迁移元素与水迁移元素	161
化学元素的水迁移强度	163
后生过程的分类	171

第十章 氧化系列的后生过程	177
硫酸过程	177
酸性过程	185
中性碳酸盐过程	188
氯化物-硫酸盐过程	193
苏打过程	199
第十一章 还原潜育系列的后生过程	206
第十二章 还原性硫化物系列的后生过程	237
硫酸的硫化物过程	237
硫酸-硫化物过程	237
苏打硫化氢过程	242
第十三章 地球化学垒	244
地球化学垒的主要类型	245
在胶结作用时的元素后生浓集	265
第十四章 后生过程在地质历史中的发展	269
结 论	273
迁移的统一性;后生过程的地球化学类型和表生带的自然体;表生带自然体的地球化学分类;风化壳的基本地球化学类型;大陆沉积物的基本地球化学类型;后生过程的特征;还原环境的地球化学类型;天然水的地球化学分类;潜水的水化学垂直带性;古水文地质问题;表生过程和水热过程;矿床的形成及其周围的次生扩散晕;研究后生过程的方法。	
参考文献	293

引 言

地壳表层可称为表生带，其中化学元素的迁移是在低温低压下进行的。该层的厚度由岩石圈算起，有的地方可达到几千米，其下部即为变质岩带，再下为岩浆带。A. E. Ферсман (1934) 建议用表生作用这一术语。土壤形成作用、风化作用、沉积形成作用、地下水的地球化学作用及其它的地表过程都属于表生作用。本书中所使用的就是这一广义的术语。因此，表生过程与高温高压下地壳深处进行的内成作用是对立的¹⁾。

进入地表的太阳能源决定了表生过程的巨大多样性、复杂性、不均衡性以及自由能的富集。因此，尽管是在低温低压条件下，但表生带化学元素的迁移却是非常强烈的；一些在内成条件下²⁾ 尚未了解的物质在表生带中得到了高度的分异，个别元素得到了大量的富集。

在表生带中进行着喷出岩、变质岩与沉积岩的各种变化过程，并随之与周围环境进行物质交换。这些变化不是由成岩之前过程所决定的，也不是岩浆的沉积、成岩与结晶作用等过程不可避免的继续。对岩浆岩的关系来说是次生的，累加

1) 表生作用、表生过程这一名词在文献中有不同含义。例如，表生作用仅作为风化作用的同义词。与 A. E. Ферсман、A. A. Сауков 等地球化学家的观点一致，我们采用的这一术语就是指上述含义。

2) 在表生带中，大家知道有由二、三个主要元素组成的岩石、矿物与气体的大量积聚；纯石灰岩(CaCO_3)、食盐矿(NaCl)、硬石膏(CaSO_4)、甲烷等就是这样的。

的。这些过程我们称之为后生的(后生作用)¹⁾。

矿床周围次生扩散晕的形成与这种过程有关系。很多地球找矿方法就是以这种研究为依据的。一系列外成矿床的形成归因于元素的后生累积。铀矿、铜砂矿与硫矿床便是由此决定的。这种过程在很大程度上也决定了地表地下水化学组成与土壤形成以及用某些岩石作建筑物与建筑材料基础的可能性。

后生作用的研究是很不平衡的。如果说成土作用、风化作用早已较全面地进行了研究的话,那么地下水的地球化学活动则很少了解。这一领域中的某些现象,例如后生的潜育作用只在近年来才引起人们的注意。

在本书中从地球化学的观点研究了后生过程,其理论基础是克拉克学说、地壳中化学元素的迁移规律和生物地球化学、景观地球化学与水文地球化学。

具有高度化学活性的地表与地下水是岩石后生变化的最重要因素。但是天然水既不是惰性体,也不是实验室中的水溶液。正如 Вернадский 首次提出的,这是一个特殊的生物惰性体,其化学组成的形成与生物活动有关系。因此,岩石的后生变化不仅是机械的、物理的与化学的现象,而且也是复杂的生物过程。

在具体情况下,表生带的不同过程是共同起作用的,这些过程彼此联系,互相制约。这些过程是属于生物的(生物地球化学的)、物理和化学的现象。但是,为了认识其相互影响有

1) 在成矿学说中,很多地球化学家与地质学家对后生作用、后生过程的理解是有分歧的。在地质文献中,后生过程属另一个过程的范畴。在很多岩石学家的著作中,把后生作用理解为沉积岩变化的一个阶段,主要是变质作用。因此,后生作用同表生作用一样,是以不同理解使用着。我们强调这种情况,并认为地质学家的权威中心应注意在地质学名词方面的这一混乱情况,并应作相应的介绍。

必要单独地研究每一个过程，也有必要把表生迁移作用划分成类型。

物质运动的形式是我们这种分类的基础。原子的迁移就与此有关。可以分出三个主要的表生迁移类型 (А. И. Перельман, 1961):

1. 生物迁移作用。
2. 物理化学与化学迁移作用(物理-化学);
 - a. 水迁移作用;
 - b. 空气迁移作用。
3. 机械迁移作用;
 - a. 水的机械迁移作用;
 - b. 空气的机械迁移作用;
 - c. 重力的机械迁移作用。

表生带的化学反应与化学家在实验室中惯于与之打交道的那些过程有很多不同。非实验反应所特有的因素在自然界被提到首位。在决定表生作用特点的诸因素中，我们首先分出了生物的地球化学活动(活的物质)与元素在地面上分布的不均匀性(与克拉克值不同)。关于这些因素对原子迁移作用的巨大影响的概念是这一研究工作中的主要课题之一。

第一章 生命物质的地球化学作用 (生物迁移-生物作用)

В. И. Вернадский 第一个证明：活有机体是表生带化学元素迁移的最为重要的动因。在地球化学领域中，重要的不是研究各别的有机体(这是生物学中着重研究的)，而是研究活有机体的总和、总体及其对周围环境影响的结果。В. И. Вернадский 称这种活有机体的总和为生命物质。它可以指整个陆地(或整个地球)的生命物质，也可以指有限范围内——如自然带、景观、沉积岩系等生命物质。地球上生命物质的总量要比岩体少许多倍。但是这些生命物质经常由地壳

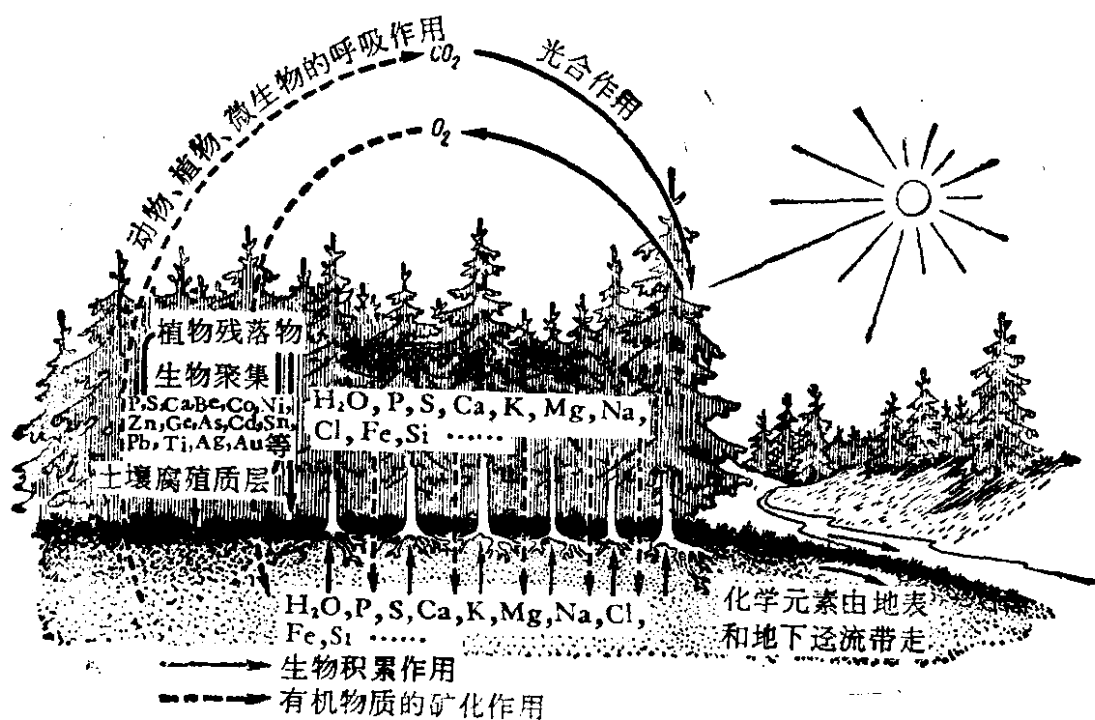


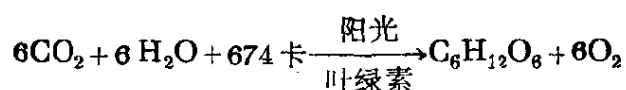
图 1 景观中元素的生物循环

的无机体所形成,并重新分解,由此而进行循环。子。

在地壳中进行着原子的、由有机质的形成和分解组成的生物循环(图 1)。这种循环决定了各种表生过程的地球化学特点。

生命物质的形成

由周围环境中的无机化合物形成的生命物质,主要是绿色植物生命活动的结果。绿色植物将二氧化碳、水、矿质盐类合成有机物质。这种光合作用通常以下列简化了的反应式表示:



植物从空气(大气或土壤)中吸收 6 个分子的 CO_2 ,由土壤或水体中吸收 6 个分子的水,在叶绿素的作用下,从太阳光中吸收了 674 卡的热量,就形成了有机化合物——碳水化合物等。借光合作用,还能产生其它更复杂的有机化合物,如蛋白质等。植物还从土壤和水中吸收钙、镁、钾、铁及其它元素,用来合成复杂的有机化合物。其结果,就在地球表面和海洋表层聚积了大量的有机能和 C、H、N 原子以及其它“含能元素”。

上述过程被称为无机化合物(H_2O 、 CO_2 和无机盐)的生物累积。

包含在复杂有机化合物成分中的元素是地壳中化学元素存在的特殊形态。

动物、某些植物(如真菌)及大部分微生物,不能从矿物合成有机化合物,而是利用植物的蛋白质、脂肪、碳水化合物及其它物质,构成自己机体的器官和组织,产生新的蛋白质、脂肪、碳水化合物等。这样,就创造了大量形形色色的生命物质。而其本源则都是光合作用。

已有的微生物,是借助于化学反应的能量(如硫、铁的氧化),而不需太阳光能参与将矿物质合成有机化合物。这种被称为“化学合成作用”的过程便导致了表生带生命物质(微生物体)的形成。然而它在整个有机化合物的聚积平衡中的作用是微不足道的。

地壳的全部化学元素都是通过活的有机体。对于某些元素来说,这种存在形态是很有特色的。这些元素(如碳、氮、部分硫、钾、磷)的大部分原子经常处于复杂的有机化合物的组成中。

有机体基本上是由形成气态的(O_2 、 N_2 、 CO_2)或形成可溶性化合物($Ca(HCO_3)_2$ 、 $NaCl$ 、 KCl 等)的化学元素所构成。在全部有机体中,氧最多,其次是C、H、Ca、K、N、Si、P、Mg、S、Na、Cl、Fe。

根据活有机体中的含量通常将全部化学元素划分为大量元素、微量和超微量元素。

活有机体的平均组成成分

(根据 A. И. Виноградов 1954 年资料)

大 量 元 素 ($n \times 10^{-1} - 10^{-2}$)

O——70	N——0.3	S——0.05
C——18	Si——0.2	Na——0.02
H——10.5	Mg——0.04	Cl——0.02
Ca——0.5	P——0.07	Fe——0.01
K——0.8		

微 量 元 素 ($n \times 10^{-3} - 10^{-5}$)

Al—— 5×10^{-3}	Zn—— 5×10^{-4}	Pb—— 5×10^{-5}
Ba—— 3×10^{-3}	Rb—— 5×10^{-4}	Sn—— 5×10^{-5}
Sr—— 2×10^{-3}	Cu—— 2×10^{-4}	As—— 3×10^{-5}
Mn—— 1×10^{-3}	V—— $n \times 10^{-4}$	Co—— 2×10^{-5}
B—— 1×10^{-3}	Cr—— $n \times 10^{-4}$	Li—— 1×10^{-5}

La—— $n \times 10^{-3}$	Br—— 1.5×10^{-4}	Mo—— 1×10^{-5}
Ti—— 8×10^{-4}	Ge—— $n \times 10^{-4}$	Y—— 1×10^{-5}
F—— 5×10^{-4}	Ni—— 5×10^{-5}	Cs——接近 1×10^{-5}

超微量元素 ($<10^{-5}$)

Se—— $<10^{-6}$	Hg—— $n \times 10^{-7}$
U—— $<10^{-6}$	Ra—— $n \times 10^{-12}$

为了解决一系列的地球化学问题,了解有机体的灰分组成是非常重要的,因为被植物从岩石圈中吸收来的正是这些灰分元素,而在植物死亡后,这些元素又进入岩石圈和水圈中。

从表 1 可以看出,许多元素在灰分中的含量与其在地壳中的平均含量有相当大的不同。植物能够选择吸收并把某些元素集积于灰分中。植物的这种能力以**生物吸收系数**(A_x)来表示。这一系数说明元素 x 在植物(或某种植物)灰分中的含量,比之它在全部岩石圈(或生长该种植物的土壤、岩石)中的含量要大多少倍。分析 A_x 值,可构成专门的元素生物吸收序列(表 2)。

表 1 中的材料说明活有机体灰分平均化学组成成分以及相应的 A_x 平均值的资料。这些数值可能在数十、数百、甚或数千倍的幅度内摆动。那些能在自己肌体内选择集积这些或那些元素的所谓“**生物富集者**”引起我们巨大的兴趣。

例如,众所周知,有多种陆上的和海生的动物——如软体动物、珊瑚、牡蛎、有孔虫等具有石灰质骨骼,是 CaCO_3 的富集者。这些动物死亡后,其骨骼部分形成石灰沉淀,进而形成湖泊或海洋石灰岩层。

硅的富集者——海绵、放射虫、硅藻等也是有一定代表性的。由于它们活动的结果,就在陆地上(在湖泊中)和海洋中造成二氧化硅的大量聚积,形成硅藻土、硅藻岩及其它岩石。

某些微生物能在自己的机体中富集铁和锰。已查明下列

表 1 大陆活有机体灰分的平均组成成分和生物吸收系数¹⁾

化学元素	岩石圈的 克拉克值*	地面植物灰分的 平均组成成分	生物吸收系数
Ca	3.60	$n \times 10 (n < 2)$	n
K	2.50	$n \times 10 (n < 3)$	n
Si	29.5	n	$0. n$
Mg	1.87	$n (n < 5)$	n
P	0.093	$n (n < 5)$	$n \times 10 - n \times 100$
S	0.047	$n (n < 5)$	$n \times 10 - n \times 100$
Na	2.50	n	n
C	0.017	$n (n < 5)$	$n \times 10 - n \times 100$
Fe	4.65	$0. n - n (n < 2)$	$0. n - 0.0 n$
Al	8.05	$0.0 n$	$0.0 n$
Ba	0.065	$0.0 n - 0. n$	$0. n - n$
Sr	0.034	$0.0 n - 0. n$	n
Mn	0.10	$\sim 1 \times 10^{-2}$	$0. n$
B	1.2×10^{-3}	$0.0 n - 0.00 n$	$n - n \times 10$
La	2.9×10^{-3}	$n \times 10^{-2} - n \times 10^{-3}$	n
Ti	0.45	$0.0 n$	$0.0 n$
F	0.066	$0.0 n$	$0. n - n$
Zn	0.0083	$\sim 1 \times 10^{-2}$	n
Rb	0.015	$0.01 - 0.00 n$	$0. n - 0.0 n$
Cu	0.0047	$\sim 5 \times 10^{-3}$	$0. n$
V	0.009	$\sim 5 \times 10^{-4}$	$0.0 n$
Cr	0.0083	$\sim 5 \times 10^{-4}$	$0.0 n$
Cd	1.3×10^{-5}	$n \times 10^{-4}$	n
Ge	1.4×10^{-4}	$n \times 10^{-3}$	$0. n - n$
Ni	0.0058	$\sim 1 \times 10^{-3}$	$0. n$
Pb	1.6×10^{-3}	$\sim 1 \times 10^{-4}$	$0. n$
Sn	2.5×10^{-4}	$n \times 10^{-4}$	$0.0 n - 0. n$
As	1.7×10^{-4}	5×10^{-4}	$n - 0. n$
Co	0.0018	$\sim 4 \times 10^{-4}$	$0. n$
Li	3.2×10^{-3}	$n \times 10^{-4} - n \times 10^{-3}$	$0. n$
Mo	1.1×10^{-4}	$n \times 10^{-4} - n \times 10^{-3}$	n
Y	2.9×10^{-3}	$n \times 10^{-4} - n \times 10^{-3}$	$0. n$

续表 1

化 学 元 素	岩 石 圈 的 克 拉 克 值*	地 面 植 物 灰 分 的 平 均 组 成 分	生 物 吸 收 系 数
Cs	3.7×10^{-4}	$n \times 10^{-4}$	$0.n$
Se	5×10^{-6}	$n \times 10^{-5}$	$<n?$
U	2.5×10^{-4}	$n \times 10^{-5}$	$0.0n$
Hg	8.3×10^{-6}	$n \times 10^{-6}—n \times 10^{-5}$	$0.n—n$
Ra	1×10^{-10}	$n \times 10^{-11}—n \times 10^{-10}$	$0.n—n$
Sc	1×10^{-3}	$n \times 10^{-6}$	$0.00n$
Zr	0.017	$n \times 10^{-4}—n \times 10^{-3}$	$0.0n$

1) 计算灰分的平均组成成分时, 应用了生命物质的平均化学组成与直接测定的植物灰分中的元素含量 (А. П. Виноградов, В. А. Ковда, Д. П. Малюга, А. Л. Ковалевский, Б. Ф. Мицкевич, Н. П. Ремезов 等)。

* 克拉克值意指该元素在整个岩石圈中的平均含量百分比——译者。

元素都能为生物所富集: H、Li、Be、B、C、N、O、Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ge (?)、Se、Sr、Mo、Ag、I、Au、Pb、Ra、U。

在同一种景观中的同一种土壤上, 不同种的植物有不同的组成。例如, 禾本科植物经常比豆科草本植物含有较多的二氧化硅, 而后者则含钙较多。分析了单个种的草本和木本植物便可确定, 在一种植物中锰含量增高; 在另一种中锶含量增多; 而在第三种中则锌含量较高, 等等。生命体的化学成分是在长期演化过程中形成的, 这是比动植物的外部形态或生理特性还重要的种的特征 (Виноградов, 1932)。因此, 该种生命体在任何条件下都有它固有的化学成分。例如, 缺钙土壤上的豆科草本植物, 其灰分中仍将含有大量的钙; 还有所谓喜“铜的”或“锰的”生命体, 能从贫瘠食料中吸收这些元素, 等等。但是, 该景观、水域、含水层的地球化学条件对有机体也会发生影响, 在某种程度上改变它们的化学组成。例如, 在矿

表 2 元素生物吸收序列

		生 物 吸 收 系 数					
		$100 \times n$	$10 \times n$	n	$0.1n$	$0.01n$	$0.001n$
生物集积元素	强烈的	P, S, Cl					
	强度的		Ca, K, Mg, Na, Sr, B, Zn, As, Mo, F				
生物摄取的元素	中度的			Si, Fe, Ba, Rb, Cu, Ge, Ni, Co, La, Y, Cs, Ra, Se, Hg			
	微度的				Al, Ti, V, Cr, Pb, Sn, U		
	极微的						Sc, Zr, Nb, Ta, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Hf, W

床地段,那里的土壤和水中富有多多种金属,植物、动物被迫有次序地吸收多量的金属元素。结果,在动、植物的灰分中金属含量就提高了,而发生所谓“生物地球化学扩散晕”的现象。根据这种现象便建立了生物地球化学找矿的方法。同时,在一种有机体中观察到某些元素的富集,而在另一种有机体中这些元素则几乎没有。因此,在找矿时选择指示体(植物品种)具有重大意义。

不少地区出现这种或那种元素含量增高或降低(比之平均值)的现象。这些地区的有机体就以一定的方式(改变其大小,某些地方发生专门的疾病等等)反映周围环境的化学条件。这些地区被 А. П. Виноградов 称为“生物地球化学省”。