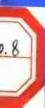


物探数据的总梯度解释法

B·M·别列兹金 著

地质出版社



077186

物探数据的总梯度解释法

57/52/69

B.M. 别列兹金 著

陆 克 刘文锦 焦恩富 译



200403857

地质出版社

(京)新登字 085 号

内 容 简 介

本书讨论了广泛用于解决构造问题和普查油气田的重磁法、电法、地震法的实测数据处理方法；给出了方法的理论基础与数学工具，介绍了方法在资料处理及解释方面的应用；叙述了用于物探数据综合处理的总梯度求和法。

本书适合于从事油气田和金属矿产普查的物探工作者。

Березкин Валентин Макарович
МЕТОД ПОЛНОГО ГРАДИЕНТА ПРИ
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО НЕДРА
МОСКВА 1988

物探数据的总梯度解释法

В.М. 别列兹金 著

陆 克 刘文锦 焦恩富 译

责任编辑：曹 玉

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：850×1168¹/₃₂ 印张：6 字数：155000

1994年4月北京第一版·1994年4月北京第一次印刷

印数：1—800册 定价：6.15元

ISBN 7-116-01415-2/P·1157

序 言

(致中国读者)

请中国专家指正的这本书致力于解决用重磁勘探普查金属矿产和油气藏的各种问题。正如实践证明的那样，本书所叙述的总梯度法的主要优点之一是在数学处理阶段能获得与物探、地质资料关系不大的信息。通过弄清所谓重磁异常的奇点及异常源的手段来达到这一目的。由于这种处理原始数据的手段的无关性，而广泛地应用能够解决很多重要问题的重磁勘探，如为油气远景区布置现代地震勘探作前期准备，直接评价已查明的构造内油气的存在，寻找金属矿体和煤层的构造破坏，发现岩溶发育带等。根据重磁场的奇点，已获得地质解释的可靠准则和激发体的定量参数（深度和平面大小）。现在扩大到物探、化探等数据的综合处理，以及综合处理后的数据的再处理。

本书所叙述的方法能够建立高分辨率的信息量参数和简单的综合参数。

目前该方法正在不断地完善，即建立较稳定的数学工具，研究三维（面积性）方法和相位方法，以及把软件移植到 УВМ 型计算机上。

В. М. Березкин

1991 年 10 月

译 者 的 话

本书作者于60年代提出总梯度解释法。经过二十多年的发展，该方法在理论和实践上日臻完善。通过对物探数据的单一处理或综合处理，解决了用物探方法直接普查油气田和金属矿床的某些问题。

本书为我国物探工作者提供了一种新的解释方法。在一定条件下，结合实际，灵活地运用它，将会取得好的地质效果。

总梯度法的数学理论基础尚需作进一步的深入研究，使其建立在精确可靠的数学基础上。

本书原名是 Метод Полного Градиента При Геофизической Разведке。为简单明确起见，译为《物探数据的总梯度解释法》。

中国地质大学曾华霖教授审阅了译稿，提出许多宝贵意见，提高了翻译质量，对此表示深切的谢意。

书中不妥之处，请读者指正。

译 者

1993年1月

目 录

引 言	(1)
第一章 油气田普查工作中总梯度法的物理-地质基础	(3)
第一节 背斜型油气田的物理-地质构造特点	(3)
第二节 总梯度法在油气地球物理工作中可能解决的主要地质问题	(28)
第二章 总梯度法的理论基础	(31)
第一节 归一化总梯度算子 G_H 的一般知识	(31)
第二节 以傅里叶级数为基础的算子 G_H 的数学工具	(36)
第三节 傅里叶级数系数的计算及其项数的选择	(43)
第四节 无原始数据的谱展开式时算子 G_H 的数学工具	(51)
第三章 重磁资料处理与解释	(58)
第一节 位场解析延拓与奇点	(58)
第二节 某些规则形体的非归一化总梯度函数 $G(x, z)$	(61)
第三节 函数 $G_H(x, z)$ 向下半空间延拓及计算的特点	(66)
第四节 某些规则体的 $G_H(x, z)$ 场实例	(81)
第五节 B. H. Страхов 对总梯度的改进	(89)
第六节 油气田的普查	(93)
第七节 密度界面的查明与研究	(106)
第四章 电法和地震勘探数据的处理	(124)

第一节	电法数据的处理	(124)
第二节	地震勘探数据的处理	(131)
第五章	地球物理数据及其他数据的综合处理	
	与解释	(149)
第一节	总梯度求和法 (CTIF) 的一般知识	(149)
第二节	总梯度求和法计算方案中的参数选择	(150)
第三节	综合处理与解释	(154)
第四节	综合解释结果的概率估算	(172)
结束语		(180)
参考文献		(182)

引 言

60年代末作者提出了总梯度法,用来处理和解释直接普查油气田的重力资料。该方法首先用于从实测重力场中分离出各种地质体(油气田、构造、断裂等)引起的不强的异常,并获得这些异常源的地质概念。

由于总梯度法的数学工具有特殊的滤波性质,其基本算子 G_H 是归一化总梯度,代表复杂的非线性带通滤波器,因此可以分离出有意义的异常。根据傅里叶级数求得的算子 G_H 具有很大的灵活性,频带容易改变,所以能够分离出不同埋藏深度和形状的场源体所产生的原始场某些分量。

重力场的奇点带来了场源体的地质信息。在重力场向下半空间延拓的过程中,用算子 G_H 确定奇点。不用其他信息,根据奇点也可以判定地质体的埋藏深度及平面大小。在背斜构造的情况下,能够判定油气田的存在。

后来表明,总梯度法也可应用于磁场的处理和解释。

最初在实践中广泛地推行这个方法时,引起了一些研究者的极大兴趣。作者的许多论文和两本专著以及其他数十种出版物都讨论了总梯度法^[3,4]。但是,近些年来的资料揭示出总梯度法新的应用的可能性,在某种程度上对此并未进行总结和分析,这明显地阻碍了它在地球物理工作中进一步的应用。已取得的成果是编写本书的基础。

因为总梯度法主要是用来解决石油地球物理问题。本书反映了目前所积累的油气田物理-地质构造的资料。分析这些资料,建立一种背斜型油气田模型。

这种模型是以普查油气田时用总梯度法处理地球物理场的地质解释结果为基础的。

此外，本书还考虑了用完善的数学工具对总梯度法开展新的探索，并注意到其他作者的研究工作。

近年来，扩大了总梯度法解决地质问题的范围。没有密度资料，能够研究和勾绘近垂直和近水平的密度界面即属于这类问题。断裂是一种最典型的近垂直界面。已经证明，重力勘探有可能研究这类界面，而总梯度法明显地提高了解决这种问题的效果。在没有密度资料的情况下，勾绘近水平界面的问题（基底表面等），不久前开始实现。这时已经弄清，近水平界面有许多奇点，足以得到关于界面形状的概念。

虽然这个问题需要进一步研究，但现在已有一些实例，证明这方面是很有前途的。

算子 G_H 是数学滤波器，自然会产生把它应用于电法和地震法资料处理的想法。电法资料（视电阻率断面资料）的处理原则上与面积性重力测量资料的处理没有区别，因此在应用算子 G_H 的方法上没有特殊的复杂性。试验表明，算子 G_H 从视电阻率断面上发现和划分异常的可能性与重力场情况相同。

算子 G_H 应用于地震记录，得出新参数。它在物理意义上表述了路径的总能量（动能加势能）。

这个参数在几何上接近于包络线，描述了瞬时幅度的分布。

众所周知，国外和前苏联基本上利用希尔伯特变换来研究这种问题。利用算子 G_H 给出比较正确的结果。

最近，总梯度法广泛应用于地球物理资料的综合处理，旨在更可靠地发现和查明与金属矿床有关的不强的地球物理异常及其他异常。

综合处理在于建立综合参数。采用算子 G_H 对各种原始数据作预变换的办法，来建立综合参数并构成总结果。

这种方法叫做综合总梯度法（СПГ 法，Метод суммирования полных градиентов）。

综合总梯度法能够查明为随机干扰水平 $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$ 的某些参数的异常。

本书叙述了总梯度法的应用特点及其结果的评价。

第一章 油气田普查工作中总梯度法的物理-地质基础

近年来，勘查地球物理的主要任务是普查有远景的背斜型油气圈闭及准备为深部钻探作准备。目前，它增加了普查非背斜圈闭及在已查明的圈闭中直接预测油气藏（评价可能的规模）或者直接普查油气藏的任务。通常背斜圈闭的幅度明显地减小。有必要研究这种有意义的地质体所产生的幅值较小的异常响应，因此给地球物理工作方法带来了很深的影响。

在异常幅度变小的情况下，地质介质“更加广泛地变成”引起各种异常的因素。有意义的地球物理异常出现在其他响应（干扰）的背景上，分离异常的可靠性降低，异常解释的非单一性增加。这些情况对解决上述问题造成非常大的困难。因此，对地球物理测量结果作专门的预处理具有很大的意义，首先是减小干扰背景。但是，成功的预处理，特别是以后的地质解释，基本上取决于对被探测的地质体模型的认识。

第一节 背斜型油气田的物理-地质构造特点

包含油气田的沉积地层的初始物理-地质模型一般建立在介质的物理性质呈均匀层状分布的基础上。按照这种概念，沉积地层均匀地由若干层组成，各层表面非常平坦，其内部的物理性质不变或者变化很小。但是，在各层的界面上，物理性质沿垂向发生突变。从实际积累的资料来看，均匀层状介质模型是一级近似于实际情况的。首先各层的界面可能是粗糙的，存在断裂和明显的弯曲等。各层的某些区段沿横向或其内部的物理性质明显不同。

不仅在界面上，而且在各层内部，物理性质沿垂向也发生变化。在油气田的断面上，物理性质的分布特别复杂。总的看来，这一范围的复杂性明显增加。

目前，对背斜型油气田研究得最多，下面将重点讨论。应当指出，它们的物理-地质构造要素与非背斜型油气田有关。

图1是地台型背斜油气田物理性质分布的综合图（模型）。该图是根据大量钻探资料和地质-地球物理研究资料绘制的。正如看到的那样，在油气田范围内，划分出七个对地球物理场有影响的物理性质上的异常因素。现在讨论油气藏断面范围内各层物理性质的差异。

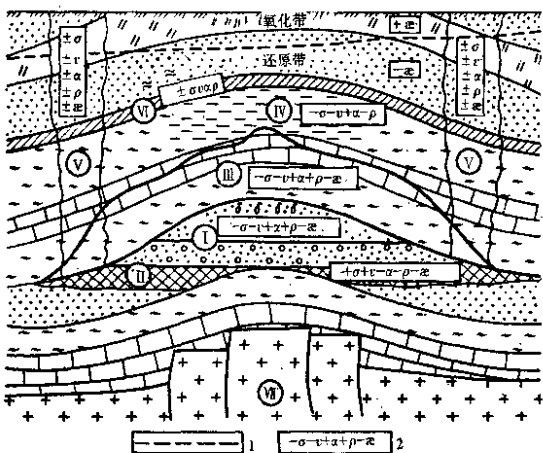


图1 地台型油气藏构造范围内岩石物理性质分布图

I—油气藏；II—封闭层；III—侵入岩；IV—背斜顶部岩石软化带；V—非均匀岩石的近垂直带（不同应力状态）；VI—不同物理性质岩石之间的界面；VII—基底；1—氧化带与还原带的界面；2—岩石物理性质情况（相对油气藏周围的岩石）

油 气 藏

油气藏位于储集层里，它在物理性质上相对储集层周围的含水层是孤立的异常体。

储集岩的物理性质决定于颗粒的粒度成分和矿物成分，骨架的结构特征，孔隙率和渗透率，胶结物类型，骨架的力学性质，孔隙中水的数量及水的矿化度等。埋藏的热动力学条件（各向压力和温度）具有很大意义。

储集层千差万别，可以划分为两大类：砂-粉砂岩类和碳酸盐岩类。前者主要是砂岩和粉砂岩，后者是石灰岩和白云岩。前苏联主要油气田产于分布最广泛的砂-粉砂储集岩里。孔隙度平均值为15—20%。渗透率从1到10000 μm^2 以上。碳酸盐储集岩的孔隙率（平均10—15%）和渗透率较小。孔隙中剩余水的数量由5%到65%。油气饱和度达0.5—0.7以上。泥质和碳酸盐胶结物的分布最为广泛，此外还常见到蛋白石、磷酸盐和铁质胶结物等。

压实作用、次生胶结作用、孔隙和裂隙中矿物的重新形成等次生作用，对碳酸盐和陆源储集岩的物理性质有很大影响。所形成的铁氢氧化物、方解石、黄铁矿、石膏、石英、自生泥质矿物，使岩石的储集性变化，同时改变了物理性质。

油气藏的特殊性质决定于两个因素：油气本身的物理性质（油气因素）和骨架结构特点（骨架因素）。

油气的物理性质明显地与周围水的性质不同，因此油气藏与储集层周围的岩石在密度、电性、声学性质及其他性质上是不同的。

石油具有封存性。它的存在起着阻碍作用。在许多情况下，使含水岩石中自生矿物形成作用完全停止。因此，在油气藏范围内的骨架，与周围岩石相比变得更加坚硬，导致它们的物理性质产生差异。另一方面看，封存的结果使岩石的储集性保存在非常高的水平上，因而油气田有可能长时间地保存在地下深处。

如果石油部分地进入圈闭，那么在油气藏范围内将发生储集性和物理性质的水平层状的变化（从上到下变坏）。

密 度

储集岩的密度 σ 与孔隙度有关，而与矿物成分的关系较小。

砂-粉砂-泥质储集岩的 σ 与 k_n （孔隙度）的关系常常接近于反线性关系。在物理性质变化范围内，从 $k_n=0$ ， $\sigma=2.80 \text{ g/cm}^3$ 到 $k_n=40\%$ ， $\sigma=1.60 \text{ g/cm}^3$ 。例如，Ставрополье ходу-мск 段的砂岩密度从 $1.60-1.70$ ($k_n=37-40\%$) 到 $1.81-1.91 \text{ g/cm}^3$ ($k_n=25-30\%$)。粉砂岩密度从 1.80 到 2.60 g/cm^3 。Усть-Балыкск 油气田的砂岩平均密度为 2.29 g/cm^3 ($k_n=22\%$)，粉砂岩 $\sigma=2.34 \text{ g/cm}^3$ ($k_n=19\%$)，泥质岩 $\sigma=2.42 \text{ g/cm}^3$ ($k_n=14\%$)^[4]。

油气使油气藏范围内的密度相对于储集层的含水部分减小，也就是说，出现有效密度 $\sigma'_{\text{эф}}$ 。显然， $\sigma'_{\text{эф}}$ 值是负的。

根据下列公式来估算，考虑油气因素的 $\sigma'_{\text{эф}}$ 值：

$$\sigma'_{\text{эф}} = (\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{нг}}) k_n k_{\text{нг}}$$

式中， $\sigma_{\text{в}}$ ——层状地层中水的密度； $\sigma_{\text{нг}}$ ——层状地层中油或气的密度； $k_{\text{нг}}$ ——油气饱和度。

计算 k_n 、 $k_{\text{нг}}$ 时以百分数表示，可以认为油田的 $\sigma'_{\text{эф}}$ 通常为 $0.05-0.10 \text{ g/cm}^3$ ，而气田为 $0.05-0.10 \text{ g/cm}^3$ 。

由于骨架因素而产生的 $\sigma'_{\text{эф}}$ 值决定于很多因素。在某些情况下，它明显地超过 $\sigma'_{\text{эф}}$ 。例如，Веселовск 油田储集层含水部分（以砂岩为代表）的孔隙度为 $1-3\%$ ，而在油气藏范围内为 $7-8\%$ 。原始孔隙度估计为 20% ，孔隙度的减少与石英再生作用的广泛发育有关。

根据 110 块标本测定的含水储集层的平均密度值为 2.54 g/cm^3 ；根据 128 块标本测定的含油储集岩的平均密度值为 2.42 g/cm^3 。因此 $\sigma'_{\text{эф}} = -0.12 \text{ g/cm}^3$ 。以 $\sigma_{\text{н}} = 0.813 \text{ g/cm}^3$ ， $\sigma_{\text{в}} = 1.03 \text{ g/cm}^3$ 进行计算， $\sigma'_{\text{эф}}$ 为 -0.02 g/cm^3 (С. С. Азаров, 1981)。

随着深度的增加，各方向的压力增大，储集岩的密度增大，而孔隙度减小。密度和孔隙度随着深度的变化是非常不均匀的。最大的变化是在 0—3 km 的深度上，特别是含泥质胶结物的岩石。但是，深部钻探证明，油气藏范围内的孔隙度在 5—7 km 深度上仍然很高，在很多情况下达到 30%。油气藏引起相对的负重力异常，一般为几个 $g \cdot u$ 。

电阻率和极化率

油气使油气藏范围内的电阻率 ρ_z 相对于油气藏周围含水储集岩的电阻率 ρ_B 增大。由于油气和骨架因素，估算油气藏的异常响应在理论上是非常复杂的。因此，采用电测井实测的 ρ_z 和 ρ_B 的对比方法，进行油气影响的研究。很明显，实测的 ρ_z 和 ρ_B 值受许多因素控制。除了油气以外，还有骨架结构、层状水的矿化、胶结物类型及埋藏的热动力条件等。

目前已有的资料证实，在某些地层中 ρ_z 可能超过 ρ_B 100 以上（表 1）。但是， ρ_z 超过 ρ_B 10 倍是最常见的。

层状水的矿化对油气藏的电阻率和各种仪器实测的视电阻率 ρ_e 有明显的影响。例如，Сурхана 油田 Сурхана 岩层的含盐度为 $14.2^\circ Be$ （ $1^\circ Be$ 为 1 波美度，大致相当于水中 NaCl 含量的 1%），油藏范围内 ρ_{KH} 平均值为 $6.2 \Omega \cdot m$ ，含水部分的 ρ_{KB} 平均值为 $1.2 \Omega \cdot m$ 。Саъучин 岩层的含盐度为 $10.9^\circ Be$ ， $\rho_{KH} = 13.4 \Omega \cdot m$ ， $\rho_{KB} = 1.8 \Omega \cdot m$ 。Балахан 岩层的含盐度为 $5.1^\circ Be$ ， $\rho_{KH} = 20.4 \Omega \cdot m$ ， $\rho_{KB} = 5.7 \Omega \cdot m$ [4]。

在西南 Туркмениния 地区的许多油田，油藏范围内水的矿化度为 80—120 g/L，在油藏周围减少到 10—20 g/L，使电阻率增大 2—4 倍。

埋藏的热动力条件的影响主要是通过饱和液体的物理性质（电性）变化表现出来。

在一般的情况下，各方向压力的增大使电阻率增大；而温度的增高使其减小，因为液体的导电率增大。由于温度的影响超过

表 1 原苏联某些油气田含油气水地层的电阻率

地 区	油 气 田	油气藏 类型	地层时代	地层电阻率($\Omega \cdot m$)	
				含油气地层	含水地层
Средняя Азия	Небит-Даг	油	上新世	2—20	0.2—5
Средняя Азия	Газли	气	上新世	50—60	5—6
Средняя Азия	Котур-Тепе	油	上新世	18	3
Средняя Азия	Окарем	油	上新世	10	2
Грозненский	—	油	中新世	8—1000	3—20
Грозненский	—	—	—	и более	—
Краснодарский край	—	油	渐新世	2—2000 и более	1.7—3.5
Краснодарский край	—	油	始新世	2.4—16	1.5—20
Ю. Мангышлак	—	油	侏罗纪	20—25	3—6
Ставропольский край	Александровская	气	始新世 古新世	2—120	2—12
Южно-Эмбенский	Косчагыл	油	石炭-三叠纪	2.5	0.4
Сахалинский	Оха	油	中新世	15—80	2—4
Западная Сибирь	Пунгинское	气	上 层 侏罗纪	1000	10
Южно-Эмбенский	Доссор	油	中 层 侏罗纪	10	0.7
Волгоградский	Жирное	油	下 层 石炭纪	12—500	1.5
Сахаролукский	—	—	上 层 泥盆纪	12—1000	0.5—2
Саратовский	—	—	泥盆纪	200	1—3
Татарский	Ромашкинo	—	泥盆纪	3—300	1—5
Туймазинский	—	—	泥盆纪	2—1200	0.4—4.5
Азербайджан	—	油	第三纪	15—150	0.3—10
Днепрово-Донецкая впадина	—	油	石炭纪	4—50	3.5
впадина	—	气	侏罗纪, 三叠纪 石炭纪	5—200	0.5—3.5

压力的影响，随着深度的增加，几乎所有类型岩石的电阻率都减小。

为了估计油气藏的总响应，可以把产油层看作是单一电性层。这样一来，产油层的含油气和含水区段的电阻率差异明显减小，

平均减小 $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$ ，个别减小 $\frac{4}{5}$ 。有效厚度50m以上的油气藏即属于这种情况。厚度较小时（20—50m），它们的差异不超过30—50%。气藏的电阻率稍微大于油藏。油气藏电阻率的增高引起各种电法的视电阻率的正异常（垂向电测深法、偶极电测深法和建立场点测深法等）。在大多数情况下，相对油气藏的周围岩石，这些异常值这百分之几十。

油气藏范围内及其上部岩石的极化率增高。这与黄铁矿的存在有关，黄铁矿是油气藏与周围岩石的复杂作用而产生的。

许多油气田（Радченков、Кенкияк、Карасязь等）的某些地层中黄铁矿的含量达到岩石体积的10—20%。

表 2 油气田及非产油构造的岩石极化率

地 区	油 气 田 类 型	η(%)		异 常 值 %
		油气藏以内	油 气 藏 外	
Газли	气	3.5—7.3	1—1.5	250—390
Узень	油气	3.1	1—1.5	140—210
Северо-Ставропольское	气	5.8—6.4	1.8	180—260
Кенкияк	油	12.8—15.4	1.5—2	670—750
Кумсан	油	5—6.4	8.5—3.5	80—100
Кокжиде	油	7.1—7.4	1.5—2	300—370
Мортук	非工业意义的油	3.2	1.5	110
Карасязь	钻探中大量油显示	4—5	1.5	170—230
Таспас	非产油井，钻探时有气显示	1.7	1.5	13
Беке	非产油井，钻探时有气显示	1.5	1.5	13
Каракыр	非产油井	1	1	—
Кокжасай	未打钻勘探	5.1	3	70

岩石极化率用 η 表示。油气藏范围内的极化率比其周围岩石高 4—6 倍 (表 2, 根据 З. Д. Круглова)。在非产油构造的顶部 η 并未增高。

地震波速度和地震波吸收

与其他物理性质相比, 我们重点研究油气藏的异常速度及吸收性质。但是, 许多地震波的传播问题尚未弄清楚。主要结果与纵波的传播速度 v_P 有关, 而与横波的传播速度 v_S 的关系较小。

速度 v_P 和 v_S 。储集岩的 v_P 和 v_S 值决定于骨架的弹性、孔隙度、孔隙压缩率、孔隙充填率、矿物成分、胶结物类型、埋藏的热动力条件等。上述因素中, 孔隙率对 v_P 的影响非常明显。 v_P 和 k_{II} 之间存在最密切的反相关关系。根据 Френкель、Бю、Николаевский、Золотарев 的地震波传播理论, 对油气因素作用下 v_P 和 v_S 变化的理论计算研究做了很大的努力。

应该注意到, 对含气砂岩 (v_{PT})、含油砂岩 (v_{PH})、含水砂岩 (v_{PB}) 中速度 v_P 的计算。这一计算是 Ф. М. Ляховицкий 和 Л. Л. Рапопорт 于 1972 年完成的。已经查明, 存在这样的关系: $v_{PT} < v_{PH} < v_{PB}$ 。但是, v_{ST} 与 v_{SH} 的最大差值不超过 50—70 m/s; 也就是说, 这两种速度实际上彼此相等, 与充满空隙的液体无关。

计算地震频率的 v_P 很有意义。这一计算是由 А. Т. Аверьух 按下列公式完成的^[1],

$$v_P = \sqrt{\frac{u_{II} + u_{CK}}{\sigma_{II} + \sigma_{CK}}}$$

式中
$$u_{II} = \frac{(1 - \beta_{TB}/\beta_{CK})^2}{\beta_{TB}(1 - \beta_{TB}/\beta_{CK} - k_{II}) + \beta_{\phi} k_{II}}$$

$$u_{CK} = \frac{1}{\beta_{CK}} + \frac{4}{3} G_{CK}$$

$$\sigma_{II} = \sigma_{\phi} k_{II} \quad \sigma_{CK} = \sigma_{TB}(1 - k_{II})$$