

不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究*

蔡永明^{1,2} 张科利¹ 李双才¹

(1 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875)

(2 国家环境保护总局环境与经济政策研究中心, 北京 100029)

摘要 使用不同土壤类别的黄绵土、灰褐土机械组成资料, 通过对比三次样条插值、二次样条插值、线性插值法插值结果, 探讨了不同粒径制间土壤质地的数学转换方法, 结果表明三次样条插值法是最优方法, 其最小相对误差不到 0.6%, 最大相对误差不超过 3.5%, 平均 2.48%。土壤质地转换数学方法的建立对于应用土壤普查资料计算土壤可蚀性 K 值, 诺谟图的验证推广有重要意义。

关键词 土壤可蚀性因子 K , 土壤性质, 质地转换

中图分类号 S157.1

土壤侵蚀是全球性的生态环境问题之一。土壤侵蚀持续发生的结果不仅使土壤质量不断下降, 而且还会淤塞河道、引起水体环境恶化等一系列问题。分布于地表的土壤不仅是侵蚀发生的场所, 也是侵蚀泥沙的主要物质来源, 土壤性质差异对侵蚀发生过程及其产沙量的多少有着极为重要的影响。因此, 研究土壤与侵蚀的关系, 定量评价其影响作用, 对认识土壤侵蚀规律、防止水土流失有重要意义。

土壤可蚀性 (Erodibility) 是评价土壤对侵蚀敏感程度的重要指标。国外从 30 年代开始研究这一问题^[1], 并于 20 世纪 60 年代由 Olson 和 Wischmeier 提出了具有实用价值的土壤可蚀性评价指标^[2,3]。这一指标值在后来的土壤侵蚀预报研究中得到了广泛的应用。Wischmeier 于 1971 年又提出了 5 个主要影响土壤可蚀性因子 K 的土壤性质数值指标, 并绘制成著名的土壤可蚀性因子诺谟图, 建立了利用常规土壤普查资料计算土壤可蚀性因子 K 的关系模型^[4-6]。在依据诺谟图计算土壤可蚀性时, 需要利用土壤质地资料。由于历史原因, 我国的土壤普查资料有多种土壤质地体系同时存在。在已经进行过的两次土壤普查中, 第一次土壤普查采用了苏联制, 第二次则采用了国际制, 而诺谟图所需的土壤质地资料采用美国制。因此, 要利用我国现有的土壤普查资料就必然涉及到不同分类标准的土壤质地转换问题。

关于土壤质地的转换, 在以往的研究中主要采用的是图解法, 就是在半对数纸上绘制出土壤颗粒的级配曲线, 然后查图读出某一土壤粒径对应的百分含量。但是这种方法存在一定的缺陷, 即曲线的绘制有一定的随意性, 且不同的人的读数也不一样。吕喜玺, 沈荣明^[7]于 1992 年提出应用二次样条插值的数学方法进行土壤质地转换, 并采用了江西宁冈的砂质壤土进行了实例转换。与图解法相比较, 二次样条插值法提供了一种数学工具对土壤质地进行客观的转换。但是由于只采用了江西宁冈的砂质红壤, 且没有实测资料验证转换的结果是否正确, 其结论是否适用于黄土高原及其它地区尚有待于进一步研究。本文收集了不同类别的黄绵土、灰褐土质地资料, 采用三次样条、二次样条、线性插值方法对土壤质地的转换及其计算精度问题进行了探讨。

1 资料与方法

对于土壤质地的转换, 我们也认为应该建立客观的数学转换方法。正如吕喜玺, 沈荣明^[7]所论述, 土壤质地在不同分类体系上的转换可以在数学上认为是一个插值问题。在土壤粒级分配曲线上, 已知

* 国家自然科学基金(40271072)、国家杰出青年基金(49725103)资助

- 通讯作者

收稿日期: 2001-07-27; 收到修改稿日期: 2002-02-21

粒径为 0.001 mm 和 0.005 mm 土壤颗粒的累积百分含量, 求美国制小于 0.002 mm 土壤颗粒累积百分含量, 可以用数值拟合和插值的方法解决。利用插值可通过函数在有限的点处的取值状况, 估计该函数在别处的值。插值问题的一般提法是: 假定已知区间 $[a, b]$ 上的实值函数 $f(x)$ 在该区间中 $n+1$ 个互不相同的点 x_0, x_1, \dots, x_n 处的值是 $f(x_0), f(x_1), \dots, f(x_n)$, 要求估算 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 中 $x = x_i (a \leq x_i \leq b)$ 某点处的值。插值的方法很多, 可以采用线性插值、多项式插值、样条函数插值等。样条函数是数值逼近的一个常用的重要方法。与多项式相比, 在用于数据拟合时样条函数要优于普通的多项式, 多项式的次数越高, 就越可能显示出剧烈的振荡, 而样条函数则不会出现这种行为^[8]。一个样条函数是由一些按照某种光滑性条件分段拼接起来的多项式组成的函数。本文将选用三次样条函数插值法进行土壤质地的转换, 在运用实测资料进行转换的过程中将对比二次样条函数、线性插值的结果。三次样条解的惟一性在数学上有详细的证明, 在这里只给出简单的说明。

$$S(X) = \begin{cases} S_1(x) & t_1 \leq x \leq t_2 \\ S_2(x) & t_2 \leq x \leq t_3 \\ \dots & \dots \dots \\ S_{n-1}(x) & t_{n-1} \leq x \leq t_n \end{cases}$$

在这个公式中, S_i 表示将在子区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 上使用的三次多项式。因为共有 t_1, t_2, \dots, t_n n 个节点, 所以有 $n-1$ 个子区间, 而在每个子区间上有不同的三次多项式。每一个三次多项式有 4 个系数, 所以待定的系数共有 $4(n-1)$ 个。由于每个多项式要通过两个节点, 这就给出了 $2(n-1)$ 个条件。再因为三次样条函数在 $n-2$ 个内节点上的一阶和二阶导数必须是连续的, 这就又给出 $2(n-2)$ 个条件, 还缺少 2 个约束条件。为了增加这两个约束条件, 最常用的方法, 也是函数 spline 所采用的方法, 采用非扭结 (not a knot) 条件。这个条件强迫第一个和第二个三次多项式的三阶导数相等。对最后一个和倒数第二个三次多项式也做同样的处理。所以共有 $2(n-1) + 2(n-2) + 2 = 4(n-1)$ 个条件。这样就可以给出三次样条的解。

我们选取了陕西靠近内蒙的神木、陕北的安塞、陕西中部的武功、山西的离石 4 个地点的土壤机械组成资料 (见表 1) 进行土壤质地的转换。4 个地点的土壤均为黄绵土, 因区域的差异存在土壤颗粒组成

表 1 黄土高原不同地点的土壤机械组成

Table 1 Soil mechanical composition in different sites of Loess Plateau

采样地点 Site	土壤质地 Texture	采样深度 Depth (m)	机械组成 Soil mechanical composition (%)					
			1~0.25mm	0.25~0.05mm	0.05~0.01mm	0.01~0.005mm	0.005~0.001mm < 0.001mm	
陕西安塞	轻壤土	0~12	0.3	18.3	58.2	5.2	6.7	11.3
陕西神木	轻壤土	0~10	0.4	30.0	47.6	5.2	5.8	11.0
陕西武功	重壤土	0~67	0.7	6.4	46.0	14.1	16.0	16.9
山西离石	中壤土	0~12	0.4	7.7	58.4	9.1	9.7	14.7

采样地点 Site	土壤质地 Texture	采样深度 Depth (m)	机械组成 Soil mechanical composition (%)				
			< 0.01mm	0.05~0.02mm	0.02~0.01mm	0.005~0.002mm 0.002~0.001mm	
陕西安塞	轻壤土	0~12	23.2	49.2	9.0	4.7	2.0
陕西神木	轻壤土	0~10	22.0	38.6	9.0	4.1	1.7
陕西武功	重壤土	0~67	46.95	26.6	19.4	10.4	5.6
山西离石	中壤土	0~12	33.5	42.4	16.0	7.2	2.6

上的不同,土壤类别分别属于轻壤土、中壤土和重壤土。以这 4 个地点的土壤颗粒组成为例,用苏联制为基础进行插值,分别采用三次样条、二次样条、线性插值的方法得出美国制、国际制主要粒级的有效粒径,来比较采用这几种方法得到的不同结果。

为了方便推广和应用,我们采用在科学研究中广泛应用的 Matlab 数学软件进行三次样条的插值。Matlab 是一个可视化、可编程的数学工具软件。因其强有力的数值分析和科学计算能力被广泛应用于数学、电子、生物等各学科的科研领域以及工业研究开发中。

以陕西安塞为例,用苏联制为基础进行插值,转换得出美国制、国际制的主要有效粒径对应的土壤颗粒累积百分含量。运行 Matlab 软件,在主窗口键入:

$$\begin{aligned} x &= [0.001 \quad 0.005 \quad 0.01 \quad 0.05 \quad 0.25]; \\ y &= [11.3 \quad 18 \quad 23.2 \quad 81.4 \quad 99.7]; \\ xx &= [0.002 \quad 0.02]; \\ yy &= \text{interp1}(x, y, xx, 'spline') \end{aligned}$$

得到:

$$yy = 13.3338 \quad 34.2859$$

x 是按照顺序排列的有效粒径; y 是按照顺序排列的小于此有效粒径的累积百分含量; xx 是插值点,即所求的土壤粒径; yy 是对应粒径的插值结果。上面的运算结果表明当土壤粒径为 0.002 mm 时,小于此粒径的累积含量为 13.33%; 当土壤粒径为 0.02 mm 时,小于此粒径的累积含量为 34.29%。

2 结果与讨论

2.1 转换实例

由于资料中大于 0.05 mm 的节点过于稀少,在确定曲线的趋势时只有 0.25 mm 和 1 mm 两个节点,会影响插值的结果。为防止出现意外和极端情况,在用三次样条插值时采取了分两段进行三次样条插值,即粒径由 0.001~0.25 mm 进行一次三次样条插值,求得粒径在 0.002 mm、0.02 mm 处的累积百分含量,对粒径在 0.05 mm 以上的部分再进行一次三次样条插值,求得粒径在 0.2 mm、0.1 mm 处的累积百分含量。表 2 是陕西安塞的数据转换结果,表中的数据表示小于此粒径的土壤颗粒累积百分含量,括号中的数据表示依据不同方法得到的插值结果。

表 2 陕西安塞数据转换结果
Table 2 The result of conversion in Ansai

粒径 (mm) Particle size	实测值 Measured value	三次样条插值 Cubic spline interpolation	二次样条插值 Square spline interpolation	线性插值 Linear interpolation
1	100	100	100	100
0.25	99.7	99.7	99.7	99.7
(0.2)	—	(95.84)	(248.44)	(95.13)
(0.1)	—	(86.69)	(239.29)	(85.98)
0.05	81.4	81.4	81.4	81.4
(0.02)	32.2	(34.29)	(17.31)	(37.75)
0.01	23.2	23.2	23.2	23.2
0.005	18	18	18	18
(0.002)	13.3	(13.33)	(11.72)	(12.98)
0.001	11.3	11.3	11.3	11.3

注:表中的数据表示小于对应粒径土壤颗粒累积百分含量(%);括号中的数据为所求的插值数据

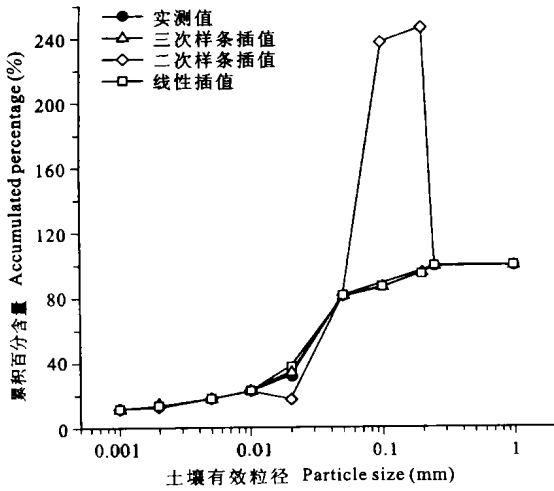


图1 陕西安塞土壤质地转换不同方法效果比较
Fig. 1 Comparison of different methods in conversion of soil texture in Ansai

将插值结果和实测值绘制为图1。从表2和图1中可以看出,在用二次样条进行插值时,在0.1 mm和0.2 mm处出现了大幅度的波动,二次样条插值的结果表现出了明显的非单调特性,不能用来进行土壤质地不同体系间的数学转换。在利用神木、武功、离石土壤机械组成资料进行转换时也出现了相同的情况(神木、武功、离石土壤质地的转换结果见表4),这说明用二次样条插值进行土壤质地的转换在黄土高原并不适用。表3是根据插值结果作出的安塞土壤质地的不同粒径制列表。需要说明的是,由于采用苏联制测定土壤颗粒组成时要过1 mm孔筛,采用美国制、国际制要过2 mm孔筛,它们的百分制的计算基础不同。在把苏联制、中国制转换到美国制、国际制时,应考虑到大于1 mm的石砾部分,否则进行质地转换的结果不精确。而我们收集到的这几个点的资料,缺少这部分资料,但其转换方法是一致的。我们将在恒山

灰褐土土壤质地的分析中加入大于1 mm砾石的资料。

表3 陕西安塞土壤质地不同粒径制列表
Table 3 The table of different soil texture systems in Ansai

粒径 Particle size (mm)	实测 Measured value	苏联制 Soviet Union standard	中国制 Chinese standard	美国制 U. S. A standard			国际制 International standard		
				三次样条 Cubic spline	二次样条 Square spline	线性插值 Linear spline	三次样条 Cubic spline	二次样条 Square spline	线性插值 Linear spline
				1	100	100	100	100	100
0.25	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	
0.2							(95.84)	(248.44)	(95.13)
0.1				(86.69)	(239.29)	(85.98)			
0.05	81.4	81.4	81.4	81.4	81.4	81.4			
0.02	32.2						(34.29)	(17.31)	(37.75)
0.01	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2			
0.005	18	18	18	18	18	18			
0.002	13.3			(13.33)	(11.72)	(12.98)	(13.33)	(11.72)	(12.98)
0.001	11.3	11.3	11.3						

注:表中的数据表示小于对应粒径土壤颗粒累积百分含量(%);括号中的数据为所求的插值数据

表 4 神木、武功、离石的土壤质地转换

Table 4 The conversion of soil texture in Shennu, Wugong and Lishi

粒径 Particle size(mm)		1	0.25	(0.2)	(0.1)	0.05	(0.02)	0.01	0.005	(0.002)	0.001
神木	实测	100	99.6			69.6	(31)	22	16.8	(12.7)	11
	3次样条	100	99.6	(93.28)	(78.28)	69.6	(32.45)	22	16.8	(12.68)	11
	2次样条	100	99.6	(206.47)	(191.47)	69.6	(18.83)	22	16.8	(11.36)	11
	线性	100	99.6	(92.1)	(77.1)	69.6	(33.9)	22	16.8	(12.45)	11
武功	实测	100	99.3			92.95	(66.35)	46.95	32.9	(22.5)	16.9
	3次样条	100	99.3	(97.96)	(94.78)	92.95	(67.88)	46.95	32.9	(21.46)	16.9
	2次样条	100	99.3	(272.02)	(268.84)	92.95	(31.98)	46.95	32.9	(17.90)	16.9
	线性	100	99.3	(97.71)	(94.54)	92.95	(58.45)	46.95	32.9	(20.9)	16.9
离石	实测	100	99.6			91.9	(49.5)	33.5	24.4	(17.3)	14.7
	3次样条	100	99.6	(97.97)	(94.12)	91.9	(49.77)	33.5	24.4	(17.43)	14.7
	2次样条	100	99.6	(251.10)	(247.25)	91.9	(28.08)	33.5	24.4	(15.31)	14.7
	线性	100	99.6	(97.68)	(93.83)	91.9	(48.1)	33.5	24.4	(17.13)	14.7

注: 表中的数据表示小于对应粒径土壤颗粒累积百分含量(%); 括号中的数据为所求的插值数据

2.2 转换精度分析

精度分析可通过相对误差大小来评估。相对误差的计算公式可写为: $P = (P_m - P_c) / P_m \times 100\%$, 式中 P_m 为实测值, P_c 为计算的插值, 比较的结果见表 5。从表 5 可以看出, 任何一个地点的土壤采用三次样条插值法的相对误差都比线性插值法的误差要小, 在这几种插值法的比较中, 三次样条法是最优的。采用三次样条插值法的最小相对误差为 0.6%, 最大相对误差为 3.5%, 平均 2.48%。

本文选用了陕西神木、安塞等 4 个地点的土壤机械组成作为研究资料, 但由于这些地点的土壤类型均为黄绵土, 土壤机械组成较为相近, 且缺乏 1~3mm 的土壤颗粒资料, 所以拟选用山西恒山灰褐土的一个土壤剖面进行进一步验证。表 6 括号中的数值是采用三次样条插值得出的结果。从表 6 山西恒山灰褐土土壤质地的转换结果来看, 三次样条插值仍然是适用的。

表 7 是利用 54~70 cm 土层数据转换结果列出的不同粒径制对照表。从表 7 可以看出, 在去除砾石后, 对比苏联制(实测值)和美国制、国际制的转换结果, 粗砂含量高的土壤结果差异较大。以粒径 1 mm 对应的累积百分含量来看, 苏联制为 49.8%, 而以 2 mm 为计算基础的美国制和国际制对应为 76.62%, 以不同的粒径制的土壤颗粒累积百分含量利用诺谟图计算土壤可蚀性 K 值必然会有很大的差异。

表 5 三次样条和线性插值相对误差比较

Table 5 Error analysis of cubic spline interpolation and linear interpolation

地点	三次样条插值法	线性插值法
Site	Cubic spline	Linear spline
陕西安塞	0.034	0.098
陕西神木	0.024	0.057
陕西武功	0.035	0.095
山西离石	0.006	0.019
平均值	0.02475	0.066

表6 恒山灰褐土数据转换结果
Table 6 The results of conversion in Hengshan

粒径(mm) Particle size	5~ 28 cm		28~ 54 cm		54~ 70 cm		70~ 80 cm	
	实测值 Measured value	三次样条 Cubic spline	实测值 Measured value	三次样条 Cubic spline	实测值 Measured value	三次样条 Cubic spline	实测值 Measured value	三次样条 Cubic spline
3	100	100	100	100	100	100	100	100
(2)		(100)		(99.79)		(65)		(85.62)
1	100	100	80.7	80.7	49.8	49.8	67.9	67.9
0.25	99.75	99.75	44.87	44.87	19.27	19.27	25.67	25.67
(0.2)		(95.63)		(41.51)		(16.06)		(21.44)
(0.1)		(85.86)		(31.29)		(10.18)		(12.34)
0.05	80.2	80.2	22.84	22.84	8.07	8.07	7.47	7.47
(0.02)	(45)	(46.65)	(16.22)	(16.06)	(6.77)	(6.91)	(6.38)	(6.56)
0.01	33.3	33.3	13.32	13.32	6.27	6.27	5.98	5.98
0.005	26.1	26.1	11.7	11.7	5.78	5.78	5.57	5.57
(0.002)	(21)	(21.37)	(10.41)	(10.38)	(5.23)	(5.20)	(5.23)	(5.19)
0.001	19.7	19.7	9.85	9.85	4.93	4.93	5.02	5.02

注:表中的数据表示小于对应粒径土壤颗粒累积百分含量(%);括号中的数据为所求的插值数据

表7 恒山灰褐土 54~ 70cm 土层不同粒径制列表

Table 7 The table of different soil texture systems in Hengshan

粒径(mm) Particle size	苏联制 Soviet Union standard	插值结果 Interpolation	美国制 U. S. A. standard	国际制 International standard
3	100			
(2)		(65.0)	100	100
1	49.8	49.8	76.62	76.62
0.25	19.27	19.27	29.65	29.65
(0.2)		(16.06)		24.71
(0.1)		(10.18)	15.66	
0.05	8.07	8.07	12.42	
(0.02)	6.77	(6.91)		10.63
0.01	6.27	6.27	9.65	
0.005	5.78	5.78	8.89	
(0.002)	5.23	(5.20)	8	8
0.001	4.93			

注:表中的数据表示小于对应粒径土壤颗粒累积百分含量(%);括号中的数据为所求的插值数据;美国制和国际制以2mm为100%计算基础

土壤可蚀性指标是土壤侵蚀预报模型中的重要参数,诺谟图是根据土壤性质计算土壤可蚀性的重要方法。由于我国的土壤普查资料存在多种土壤质地体系并存的现象,因此在应用诺谟图计算土壤可蚀性时必须进行土壤质地的转换。通过本文的论述,得出以下结论:

用数学方法进行土壤质地不同体系的转换,可以避免使用图解法的人为随意性。使用黄绵土(陕西安塞、神木、武功,山西离石)和灰褐土(土壤剖面的不同层次)不同机械组成资料对比三次样条插值、二次样条插值和线性插值方法,结果表明三次样条插值法是最优的。采用三次样条插值法的最小相对误差为0.6%,最大相对误差3.5%,平均2.48%。由于数据资料所

限,且前苏联制、美国制和国际制在机械分析方法取样以及百分制计算基础不同,所以对于粗砂含量大的土壤,采用三次样条插值方法处理时请慎重对待。

土壤侵蚀是世界性的环境问题,建立土壤侵蚀模型是进行土壤侵蚀预报、有效防治土壤侵蚀的重要工具。土壤可蚀性是土壤侵蚀模型中的重要参数,反映了土壤本身抵抗侵蚀能力的强弱,是土壤性质的反映。本文的结论对于土壤可蚀性的研究、诺谟图的验证推广有着重要的意义。

参考文献

1. Bennett H H. Some comparisons of the properties of humid-tropical and humid-temperate American soils, with special reference to indicated relations between chemical composition and physical properties. *Soil Sci.*, 1926, 21:349~ 375
2. Tamlin C Olson, Wischmeier W H. Soil-erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations. *Soil Science Society of American Proceedings*, 1963,27(5): 590~ 592
3. Wischmeier H H, Smith D D. Rainfall-erosion Losses from Cropland, East of the Rocky Mountains. Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Agriculture Handbook 282. Washington D C: USDA-ARS, 1965
4. Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of American Proceedings*, 1969, 33(1): 131~ 137
5. Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26(5): 189~ 193
6. Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook 537. Washington D C: USDA-ARS, 1978
7. 吕喜玺, 沈荣明. 土壤可蚀性因子 K 值的初步研究. *水土保持学报*, 1992, 6(1): 63~ 70
8. Ward Cheney, David Kncaid 著. 薛密译. 数值数学和计算. 上海: 复旦大学出版社, 1991

STUDY ON THE CONVERSION OF DIFFERENT SOILS TEXTURE

Cai Yong-ming^{1,2} Zhang Ke-li¹ Li Shuang-cai¹

(1 Department of Resource and Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Policy Research Center for Environment and Economy of SEPA, Beijing 100029, China)

Summary

Based on data of different soil types, the conversion of soil texture by mathematical methods including cubic spline interpolation, square spline interpolation and linear interpolation was studied. The result showed that cubic spline interpolation is superlative and the minimum relative error is 0.6%, the maximum error 3.5%, average 2.48%. The development of the texture conversion by mathematical method is valuable for calculating soil erodibility K based on data of soil properties and is meaningful for calibrating soil erodibility nomograph.

Key words Erodibility, Soil property, Texture conversion