

用于区域陆面过程模拟的土壤特征 参数的空间插值方法研究

缪驰远^{1,2} 刘宝元^{1,2} 戴永久^{1,2} 刘洪鹄^{1,2}

1 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875

2 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要 用于气候模型的陆地过程模型包括陆地水文过程模型和地球生物化学过程模型等, 它们需要网格化的土壤物理和化学属性资料。目前, 用于该类模型的土壤资料基本上是来源于20世纪70年代联合国粮农组织的1:5 000 000土壤图和4 300多个土壤剖面的属性资料, 其中所用的中国地区的土壤剖面资料不足200个。这些资料显然不能很好地表达中国区域土壤的空间分异性。早在20世纪80年代中国就开展了大规模全国范围的土壤普查, 积累了数以万计土壤剖面的属性资料, 但都是纸质数据。根据需要, 作者已数字化近10 000个中国土壤剖面的属性数据。为了模型的应用, 需要对属性数据进行空间网格化处理。但土壤具有高度的空间分异性, 为了使网格数据具有好的空间代表性, 需要对空间插值方法进行研究。利用空间插值的方法对土壤要素的空间变异的研究, 已有大量工作, 但所研究区域范围较小, 要素单一。作者基于1:1 000 000土壤地图, 利用反距离权重空间插值法, 对中国土壤属性进行了空间插值, 最终结果表明: 对于土壤中砂粒含量、粘粒含量、有机质值以及全氮含量的插值计算, 基于相邻剖面反距离权重法的空间插值效果要优于同一土属下土种的空间插值; 而对于粉粒含量、全磷含量和pH值的插值计算, 利用同一土属下土种的空间插值效果则更优; 对于土壤全钾含量的插值结果, 两种方法相差不大。

关键词 陆面过程模拟 土壤特征参数 反距离权重插值

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0708-09 **中图分类号** P40 **文献标识码** A

Study on Spatial Interpolation Approach for Soil Characteristic Data for Use in Regional Land Surface Processes Modelling

MIAO Chi-Yuan^{1,2}, LIU Bao-Yuan^{1,2}, DAI Yong-Jiu^{1,2}, and LIU Hong-Hu^{1,2}

1 School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract Land surface processes models, incorporated land hydrological processes and biogeochemical processes parameterizations and the others, require information on the soil physical and chemical properties, and their differences in soil horizons and the geographic variability. The existing soil data used for climate modeling are compiled from the Food and Agriculture Organization of United Nations Soil Map of the World (1:5 000 000) and the attribute data of soil profile more than 4 300. However, less than 200 profiles were collected for the conterminous China,

收稿日期 2007-07-20 收到, 2008-08-02 收到修定稿

资助项目 2007年度公益性(气象)行业科研专项 6-25

作者简介 缪驰远, 男, 1981年出生, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与资源环境方面研究。E-mail: miaocy@vip.sina.com

通讯作者 戴永久, 男, 1964年出生, 教授, 主要从事陆地表面模式的构造及其与大气环流模式的耦合研究。

E-mail: yongjiudai@bnu.edu.cn

and they are too sparse to represent the spatial heterogeneity of the soil in China. A conterminous China data set of soil physical and chemical characteristics has been compiled and digitized from about 10 000 sampled profiles of the Second National Soil Survey of China. For use in land surface modeling, soil attributes have to be interpolated as standardized gridded data set. The accuracy of the interpolation approach is critical for such kind of heterogeneous data set. No much works have been done on the spatial interpolation approach for the soil attributes, but some on individual attribute and on local scale. We applied the IDW (Inverse Distance Weighted) method to interpolate spatially about soil attribute, by using the database of 1:1 000 000 digital soil map, the results demonstrate that the effect using neighboring section to interpolate is better than the interpolation using the same soil genera when applied the IDW to calculate the content of the sand, the clay, the organic matter and the total nitrogen, and the results are different when applied the IDW to calculate the content of the silt, the total phosphorus and the pH value. The two kinds of methods almost do not have any difference when calculated the kalium content.

Key words land surface modeling, soil characteristic data, inverse distance weighted interpolation

1 引言

自 20 世纪 80 年代以来, 用于气候模型的陆面过程方案从简单的水桶—能量平衡^[1]模型发展到目前包含动力植被、陆面水文、植被—土壤养分循环等过程的复杂陆面模型, 它们对过程的描述逐步向真实过程逼近。为此, 需要更详细的土壤剖面不同垂直层次的土壤物理化学属性以及它们在地理空间的分异性资料。

土壤是在气候、母质、生物、地形和成土年龄等诸因子综合作用下形成的不均一和连续变化的自然综合体。田间实际情况调查表明, 即使是质地相对均一的区域, 土壤性质在同一时期也表现出不同的空间变异性^[1]。土壤的复杂性决定了任何一种方法都无法解释土壤空间变异研究中的所有问题。

1958 年我国投入了大量人力物力进行了全国第一次土壤普查, 又于 1979 年开始了历时 16 年的全国第二次土壤普查, 最终汇总编著了《中国土种志》(1~6 卷)^[2]和 1:1 000 000 的中华人民共和国土壤图等。其包含了各采样剖面的土壤理化性质和各种养分分析数据等详实资料, 反映了我国土壤的主要类型、分布规律和分布特征, 提供了较为全面的各类土壤信息。

但另一方面, 我国幅员面积辽阔, 且是世界上土壤类型最为丰富的国家, 基于中国科学院南京土壤研究所 1:1 000 000 中国土壤数据库, 我国土壤类型共分为 12 个土纲、61 个土类、235 个亚类和 909 个土属, 尽管《中国土种志》中列举了

土壤典型剖面达 2 000 多处, 且各省对更多土壤剖面进行了调查, 但这些资料在使用过程中存在两方面的问题: 1) 目前的资料为点属性资料, 而当前陆地过程模型需要网格化的土壤物理和化学属性资料; 2) 按《中国土种志》记载的 2 000 多个剖面点来算, 全国大范围尺度平均 3 000 多平方米才包含一个剖面样点, 在应用陆地过程模型亦或进行小流域综合治理时, 很多情况下需要土壤属性的地方而没有剖面样点。空间插值方法是可以根据已知的空间数据来估计未知的空间数据值的数学方法, 目前常用于土壤要素空间插值的方法有趋势面拟合、样条插值、克里格、反距离权重插值。到目前为止, 国内许多学者均对土壤要素的空间变异特征进行了研究, 但多数研究着重讨论了或是基于某一区域^[3~5]亦或是针对某类单一土壤要素含量, 如土壤氟^[6]、N^[7,8]、P^[9]、K^[10,11]、重金属^[12,13]、微量元素^[14,15]、有机碳^[16,17]以及机械组成^[18], 对于全国范围内的多指标空间插值的研究, 并不多见。本文基于全国第二次土壤普查结果, 探讨反距离权重空间插值法在我国土壤属性数据上应用的可行性, 以期在缺乏资料的情况下利用此次土壤普查数据对未知点的土壤属性进行推求。

2 资料与方法

2.1 数据资料

本研究基于中国科学院南京土壤研究所完成的 1:1 000 000 土壤数据库, 该数据库由土壤空间数据库、土壤属性数据库和中国土壤参比系统 3

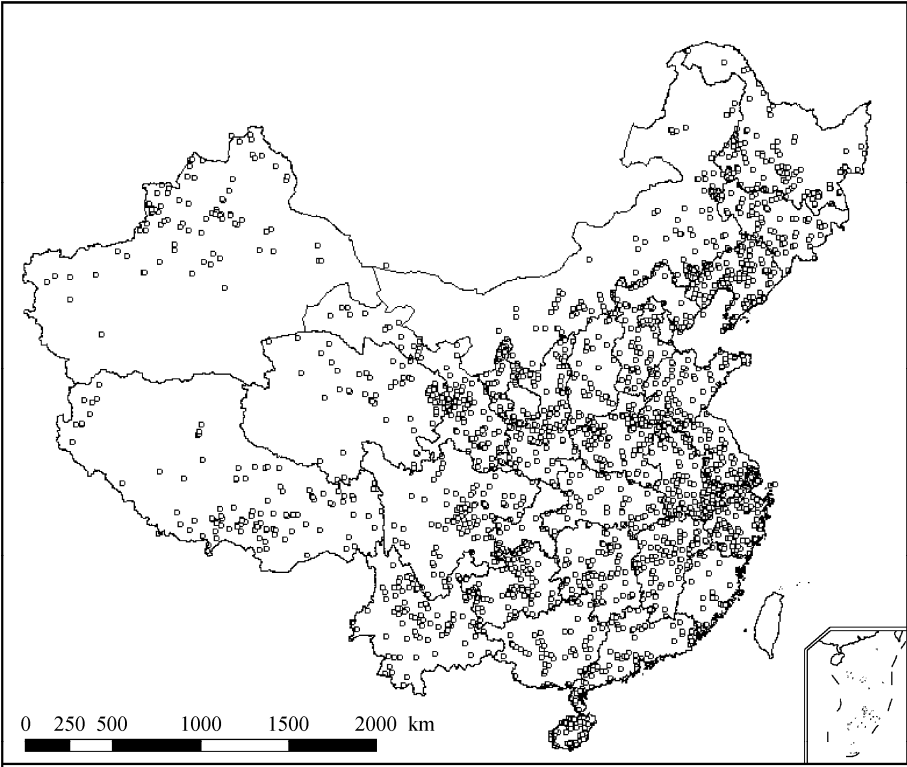


图1 《中国土种志》^[2]中典型剖面空间分布 (圆点为典型剖面地点)
Fig.1 Soil profiles distribution of the Soil Series of China^[2]

部分组成。该数据库中土壤属性数据引自《中国土种志》^[2]和全国各省(直辖市)土种志,本研究对《中国土种志》所包含的2 540个剖面(图1),选定10个土类,分别为红壤、紫色土、暗棕壤、白浆土、褐土、黑土、绵土、黄壤、水稻土和棕壤,所包含的土壤属性主要有土壤颗粒组成、pH值、有机质,全氮(N)、全磷(P)和全钾(K),在10个土类中随机选定其中的任意一种土种作为被插值点,隐藏该点的土壤属性值,并以该点为

中心,分别利用周围符合以下任一条件的土种属性值对该点进行属性插值,对进行插值的土壤剖面数要求不得少于8个,最终将插值结果与被隐藏的土壤属性真实值进行对比分析,选取的土种见表1。选取条件为:1)不考虑是否隶属于同一土属,以选定的土种为中心点,框定最相邻剖面进行空间内插值;2)基于同一土属为前提,以选定的剖面为中心点,框定隶属于同一土属下最相邻的土种进行空间内插值。

表1 选定的10种土种信息

Table 1 10 selected soil local type

剖面代号	土类	亚类	土属	土种	地理位置
30099	红壤	红壤	泥砂红土	厚砂红土	双牌县五里牌乡人民洞村都庞岭山坡中部
60387	紫色土	中性紫色土	紫泥土	凤冈紫泥土	凤冈县新冈,中低山坡地,海拔880 m
20108	暗棕壤	暗棕壤	暗麻砂土	厚麻砂土	磐石县吉昌镇西北村孤顶屯南200 m,山地缓坡
20194	白浆土	白浆土	白箔土	破皮白箔土	安图县松江镇北5 km,山前台地顶部
40173	褐土	潮褐土	潮褐泥砂土	蒙金土	蠡县小陈乡小陈村西400 m
20282	黑土	黑土	黄黑土	肥黑土	德惠县城砖厂南300 m,京哈公路东50 m
50419	黄绵土	黄绵土	绵土	崇信坡绵土	崇信县黄寨乡水泉山西南塬头,塬边中下
10167	黄壤	黄壤	麻山黄泥	乌山麻砂泥	崇义县思顺乡三江村,海拔约800 m的低山坡地
10629	水稻土	潴育水稻土	马肝泥田	马肝田	六安县孙岗乡,低田,海拔60 m
40019	棕壤	棕壤	棕麻土	僵心棕壤土	邹县城关镇崇义岭村东北600 m,缓丘上

2.2 空间插值方法

所采用的插值方法为反距离权重法（Inverse Distance Weighted approach，简称 IDW），是最常用的空间内插法之一^[19]，这一方法假设被插值点 $Z(x_0)$ 的值与邻近若干相符点 $Z(x_i)$ ($i=1, 2, \cdots, n$) 的相关，并且相关性大小与距离成反比，离被插值点越远的点，对被插值点的影响越小，公式为

$$Z^*(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^q} Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^q}},$$

式中， $Z^*(x_0)$ 为计算出的被插点的土壤属性值， $Z(x_i)$ 为已知的第 i ($i=1, 2, \cdots, n$) 个采样点的土壤属性值， n 为用于土壤插值的采样站点数目， D_i 为被插值点到第 i 采样点的距离， q 为距离的幂，本研究采用最为常用的幂 $q=2$ 。

2.3 检验标准

本文采用相对误差（ R ）和平均绝对百分比误

差（ M ）作为计算结果的评估标准，对分析两种不同选择条件下插值方法计算结果的误差大小提供了可比度量，其中相对误差的正负号，可以表示误差的倾向，为改进计算提供了依据。

$$R = \frac{O_t - P_t}{O_t} \times 100\%,$$
$$M = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{O_t - P_t}{O_t} \times 100\% \right|,$$

式中， O_t 为土壤剖面样点的单一属性真值， P_t 为运用反距离权重法对插值点的模拟计算结果。最后利用配对 t 检验，对两种插值法的计算结果值与被隐藏的真实点属性值进行双尾配对 t 检验。

3 结果讨论

将最终利用反距离权重法 IDW 计算的结果与被隐藏的土壤属性真实值进行对比，见表 2 和图 2。

表 2 两种插值方法计算结果与真值对比
Table 2 Comparison between the actual values and the interpolated values using two methods

指标	插值法	相对误差/%										平均绝对百分
		红壤	紫色土	暗棕壤	白浆土	褐土	黑土	绵土	黄壤	水稻土	棕壤	比误差/%
砂粒含量 (2~0.02 mm)	同属法	-26.63	-24.82	-11.00	-15.78	-5.67	-5.62	21.30	16.99	10.86	-10.77	14.94
	相邻法	-22.69	4.25	-13.71	-4.62	2.45	5.50	3.31	-13.40	31.79	-25.54	12.73
粉粒含量 (0.02~0.002 mm)	同属法	42.70	-14.72	9.88	2.31	13.17	29.05	-15.29	22.35	-11.72	40.78	20.20
	相邻法	36.63	-11.97	-11.59	-7.17	4.05	-12.16	-39.45	82.93	-9.19	135.40	35.05
粘粒含量 (<0.002 mm)	同属法	34.90	37.96	16.94	8.22	-1.92	-18.13	-44.15	-52.97	10.60	1.41	22.72
	相邻法	28.49	5.22	77.48	21.59	-13.01	2.51	4.06	-18.45	-14.18	7.44	19.24
有机质	同属法	37.49	-9.68	136.45	-8.20	-8.46	32.39	-40.33	92.63	缺值	184.18	61.09
	相邻法	58.10	70.14	-26.01	60.69	-14.24	-12.58	36.36	-46.06	缺值	62.70	38.69
全 N	同属法	20.48	-2.53	120.01	9.37	-17.36	2.72	34.50	93.11	1084.48	119.53	150.41
	相邻法	20.73	29.00	-40.14	115.40	-21.28	-15.85	101.15	57.91	320.57	73.19	79.52
全 P	同属法	100.68	0.46	-10.77	23.72	-39.96	2.21	27.55	-8.69	235.41	86.78	53.62
	相邻法	170.74	-1.31	-30.39	53.04	-43.63	10.23	-27.20	42.80	66.33	146.57	59.22
全 K	同属法	73.43	-24.84	-10.08	-12.19	-0.15	-1.54	缺值	-45.25	-65.78	5.74	26.55
	相邻法	29.80	-55.35	19.69	-6.67	-3.01	-11.05	缺值	-67.17	-20.25	-37.50	27.83
pH 值	同属法	18.77	0.65	-6.66	8.53	-0.51	-5.77	-0.33	7.43	缺值	2.15	5.65
	相邻法	36.47	-1.50	-0.47	8.46	0.66	14.67	-7.82	22.89	缺值	18.09	12.34

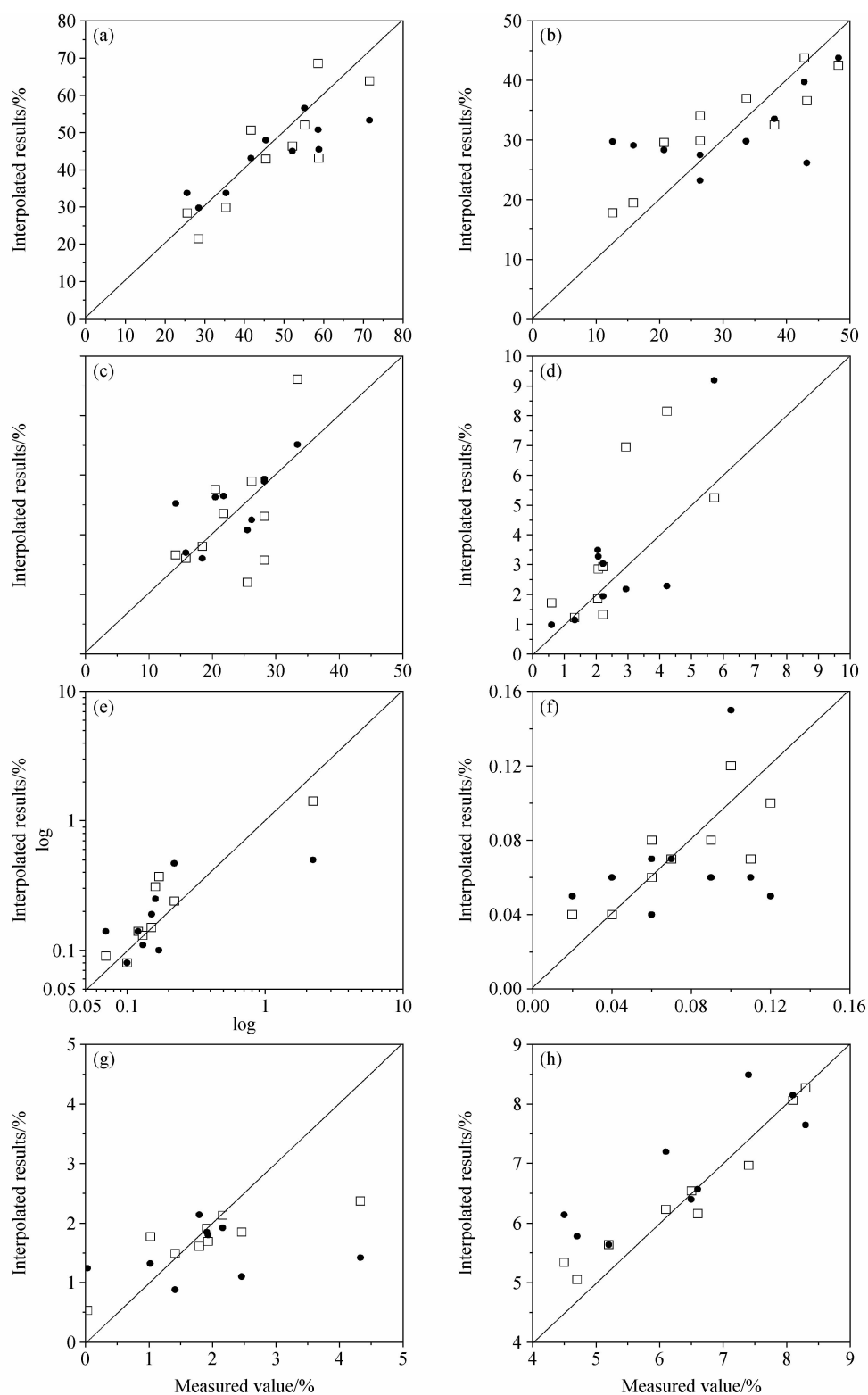


图2 两种插值方法与土壤属性真值对比 (□为同属插值对比结果, ●为相邻插值对比结果): (a) 土壤粒径 2~0.02 mm; (b) 土壤粒径 0.02~0.002 mm; (c) 土壤粒径 <0.002 mm; (d) 土壤有机质; (e) 土壤全 N; (f) 土壤全 P; (h) 土壤 pH 值

Fig. 2 Comparison between the actual values and the interpolated values using two methods (□ Interpolation using the same soil genera; ● Interpolation using neighboring section): (a) particle-size distribution in 2—0.02 mm, (b) 0.02—0.002 mm, (c) <0.002 mm; (d) soil organic content; (e) soil total nitrogen; (f) soil total phosphorus; (h) pH value

在对土壤砂粒 ($2\sim 0.02\text{ mm}$) 含量的插值计算中, 无论是利用同一土属下空间插值还是用相邻剖面土种的空间插值, 计算出来的结果均令人满意, 模拟值与真值均匀地分布在 $1:1$ 线处。同属土种插值与相邻剖面两种插值方法对土壤砂粒含量模拟的最小误差分别是黑土与褐土, 相对误差分别为 -5.62% 和 2.45% ; 最大误差是红壤与棕壤, 相对误差分别为 -26.63% 和 -25.54% 。相邻剖面插值 M 略小于同属插值。另外, 将两种插值方法对 10 类土壤砂粒含量的计算结果与真实值进行双尾配对 t 检验, 计算出同一土属下空间插值法 $t=1.040$, 自由度 $d_f=9$, 双尾显著性概率 $P=0.325$, 由于 $P>0.05$, 因此无差异假设成立; 相邻剖面空间插值法 $t=1.313$, 自由度 $d_f=9$, 显著性概率 $P=0.222$, $P>0.05$, 故两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。整体上看, 相邻剖面土种对土壤砂粒 ($2\sim 0.02\text{ mm}$) 含量插值的效果要略优于同属土种插值。

在对土壤粉粒 ($0.02\sim 0.002\text{ mm}$) 含量的插值计算中, 两种插值方法的模拟精度比砂粒 ($2\sim 0.02\text{ mm}$) 的插值效果差。从图 2 可以发现相邻插值点更为分散的分布在 $1:1$ 线两侧, 同属土种插值与相邻剖面插值的最小误差分别是白浆土与褐土, 相对误差分别为 2.31% 和 4.05% ; 最大误差和砂粒一样, 还是出现在红壤与棕壤上, 相对误差分别为 42.70% 和 -135.40% 。正如图 2 所示, 土壤粉粒含量相邻剖面插值 M 略大于同属插值。另外, 将两种插值方法对 10 类土壤粉粒含量插值与真实值进行双尾配对 t 检验, 计算出同一土属下空间插值法 $t=-0.852$, 自由度 $d_f=9$, 显著性概率 $P=0.416$, $P>0.05$; 相邻剖面空间插值法 $t=-0.087$, 自由度 $d_f=9$, 显著性概率 $P=0.933$, $P>0.05$, 故两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。整体上来看, 相邻剖面对土壤粉粒 ($0.02\sim 0.002\text{ mm}$) 含量插值的效果要略差于同属土种插值方法。

在对土壤粘粒 ($<0.002\text{ mm}$) 含量的插值计算中, 同属土种插值与相邻剖面插值的最小误差分别是棕壤与黑土, 相对误差分别为 1.41% 和 2.51% ; 最大误差是黄壤与暗棕壤, 相对误差分别为 -52.97% 和 77.48% 。相邻剖面插值 M 略小于同属插值。另外, 将两种插值方法对 10 类土壤

粉粒插值结果与真实值进行双尾配对 t 检验, 计算出同一土属下空间插值法 $t=0.172$, 自由度 $d_f=9$, 显著性概率 $P=0.867$, $P>0.05$; 相邻剖面空间插值法 $t=-1.037$, 自由度 $d_f=9$, 显著性概率 $P=0.327$, $P>0.05$, 故两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。整体上来看, 相邻剖面对土壤粒径 ($<0.002\text{ mm}$) 含量插值的效果要优于同属土种插值方法。

在对土壤有机质的插值计算中, 由于随机所选的水稻土土类有机质资料不全, 故将其舍去。在对于剩余 9 个土类的土壤有机质模拟计算过程中, 用同属与相邻两种插值方法对土壤有机质模拟的最小误差分别是白浆土与黑土, 相对误差分别为 -8.20% 和 -12.58% ; 最大误差分别是棕壤与紫色土, 相对误差分别为 184.18% 和 70.14% 。相邻剖面插值和用同属插值计算的 M 均较大, 但用相邻剖面插值对土壤有机质含量模拟的 M 明显小于同属插值结果。另外, 将两种插值方法对除水稻土以外的 9 类土壤插值与真实值进行双尾配对 t 检验, 计算出同一土属下的空间插值法 $t=-1.633$, 自由度 $d_f=8$, 显著性概率 $P=0.141$, $P>0.05$; 相邻剖面空间插值法 $t=-0.892$, 自由度 $d_f=8$, 显著性概率 $P=0.398$, $P>0.05$, 故两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。整体上来看, 相邻剖面土种对土壤有机质含量的插值计算效果要优于同属土种插值方法。

在对土壤全 N 的插值计算中, 同属土种插值与相邻剖面两种插值方法对土壤全 N 含量模拟的最小误差分别是紫色土与黑土, 相对误差分别为 -2.53% 和 -15.85% ; 最大误差偏差过大, 均是对水稻土, 相对误差分别为 1084.48% 和 320.57% 。相邻剖面插值的 M 小于同属插值结果, 在所有指标中, 无论是同一土属下土种插值, 还是相邻剖面插值, 对全 N 含量插值效果均最差 (表 2)。另外, 将两种插值方法对 10 类土壤全 N 含量插值与真实值进行双尾配对 t 检验, 计算出同一土属下空间插值法 $t=-1.369$, 自由度 $d_f=9$, 显著性概率 $P=0.204$, $P>0.05$; 相邻剖面空间插值法 $t=-1.776$, 自由度 $d_f=9$, 显著性概率 $P=0.109$, $P>0.05$, 故两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。整体上来看, 相邻剖面对土壤全 N 含量插值的效果要优于同属

土种插值方法,但两种插值结果均不能让人满意。

在对土壤全 P 的插值计算中,同属土种插值与相邻剖面两种插值方法的最小相对误差均是对紫色土的插值模拟,相对误差分别为 0.46% 以及 -1.31%;最大误差分别是水稻土和红壤,相对误差分别为 235.41% 和 170.74%。相邻剖面插值的 M 略大于同属插值计算结果。另外,对两种插值方法对 10 类土壤全 P 含量的计算结果与真实值进行双尾配对 t 检验,计算出同一土属下空间插值法 $t = -1.118$,自由度 $d_f = 9$,显著性概率 $P = 0.293$, $P > 0.05$;相邻剖面空间插值法 $t = -0.612$,自由度 $d_f = 9$,显著性概率 $P = 0.555$, $P > 0.05$,故两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。整体上来看,相邻剖面对土壤全 P 含量插值的效果要略差于同属土种插值方法。

在对土壤全 K 的插值计算中,由于随机所选的绵土土类全 K 资料不全,故将其舍去。在对于剩余 9 个土类下的土壤全 K 模拟计算过程中,发现同属土种插值与相邻剖面两种插值方法模拟的最小相对误差均是对褐土插值模拟,相对误差分别为 -0.15% 和 -3.01%;最大误差分别是红壤和黄壤,相对误差分别为 73.43% 和 -67.17%。土壤全 K 含量计算相邻剖面插值的 M 略大于同属插值结果。另外,将两种插值方法对除绵土以外的 9 类土壤插值结果与真实值进行双尾配对 t 检验,计算出同一土属下空间插值法 $t = 1.386$,自由度 $d_f = 8$,显著性概率 $P = 0.203$, $P > 0.05$;相邻空间插值法 $t = 1.598$,自由度 $d_f = 8$,显著性概率 $P = 0.149$, $P > 0.05$,故两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。整体上来看,相邻剖面对土壤全 K 含量插值的效果与同属土种插值相差不大,表现均较好。

在对土壤 pH 值的插值计算中,由于所选的水稻土土类下的随机选取的土种 pH 值资料不全,故将其舍去。在对剩余 9 个土类下的土壤 pH 值模拟计算过程中,发现同属土种插值与相邻剖面两种插值方法对土壤 pH 值模拟的最小相对误差分别是绵土和暗棕壤,相对误差分别为 -0.33% 和 -0.47%;最大误差均是来自对红壤的插值计算,相对误差分别为 18.77% 和 36.47%。相邻剖面插值的 M 明显要大于同属插值结果,在所有指

标中,无论是同一土属下土种插值,还是相邻剖面插值,对 pH 值插值结果效果均最佳。将两种插值方法对除水稻土以外的 9 类土壤插值结果与真实值进行双尾配对 t 检验,计算出同一土属下空间插值法 $t = -0.701$,自由度 $d_f = 8$,显著性概率 $P = 0.503$, $P > 0.05$;相邻空间插值法 $t = -2.051$,自由度 $d_f = 8$,显著性概率 $P = 0.074$, $P > 0.05$,故两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。整体上来看,相邻剖面对土壤 pH 值插值的效果要差于同属土种插值方法。

4 结论

基于《中国土种志》(1~6 卷)中典型剖面的地理位置,对 10 个土类下随机选取任意一种土种的土壤剖面,对其土壤理化性质进行两种方法插值,即土属下土种空间插值和相邻剖面(不考虑类型差异)空间插值,并对其插值的结果进行比较。结果发现,对于土壤中砂粒(2~0.02 mm)含量、粘粒(<0.002 mm)含量、有机质值以及全 N 含量的插值计算,相邻剖面的反距离权重法(IDW)的空间插值效果要优于同一土属下的空间插值;而对于粉粒(0.02~0.002 mm)含量,全 P 含量和 pH 值的插值计算,同一土属的空间插值效果要优于相邻剖面的空间插值;对于土壤全 K 含量的插值结果,两种方法相差不大,均较好。另外,两种插值结果与真值进行均值 t 检验, P 值均大于 0.05,即两种插值结果与真实值之间的差异均未通过显著性检验。

致谢 北京师范大学地理学与遥感科学学院张天宇、杨晓颖、刘和平、郑袁志、刘瑛娜协助完成了数据整理和标点工作,谨致谢忱!

参考文献 (References)

- [1] Heuvelink G, Bierkens M. Combining soil maps with interpolations from point observations to predict quantitative soil properties. *Geoderma*, 1992, **55** (1-2): 1~15
- [2] 全国土壤普查办公室. 中国土种志 (第一卷至第六卷). 北京: 中国农业出版社, 1993~1996
The office for the Second National Soil Survey of China. *Soil Series of China* (Vol. 1 - Vol. 6) (in Chinese). Bei-

- jing; China Agricultural Press, 1993—1996
- [3] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局—Kriging 插值分析. 地理研究, 2003, **22** (3): 373~379
Wang Jun, Fu Bojie, Qiu Yang, et al. Spatial distribution patterns of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau—Kriging method. *Geographical Research* (in Chinese), 2003, **22** (3): 373~379
- [4] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征: 变异函数与 Kriging 插值. 地理学报, 2000, **55** (5): 555~566
Guo Xudong, Fu Bojie, Chen Liding, et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua plain of Hebei Province: Semivariogram and Kriging analysis. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2000, **55** (5): 555~567
- [5] 彭凌云, 甘海华, 吴靖宇. 江门市新会区耕地土壤有效性 Si, Ca, Mg 的空间变异特征. 水土保持学报, 2005, **19** (2): 80~83
Peng Lingyun, Gan Haihua, Wu Jingyu. Spatial variability of soil available silicon, calcium and magnesium in cultivated soil of Xinhui district, Jiangmen city. *Journal of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 2005, **19** (2): 80~83
- [6] 谢正苗, 李静, 徐建明, 等. 基于 GIS 杭嘉湖平原土壤氟的质量评价. 环境科学, 2006, **27** (5): 1026~1030
Xie Zhengmiao, Li Jing, Xu Jianming, et al. Quality evaluation of soil fluorine on Hangjiahu Plain Based on GIS. *Environmental Science* (in Chinese), 2006, **27** (5): 1026~1030
- [7] 路鹏, 黄道友, 宋变兰, 等. 亚热带红壤丘陵典型区土壤全氮的空间变异特征. 农业工程学报, 2005, **21** (8): 181~183
Lu Peng, Huang Daoyou, Song Bianlan, et al. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical subtropical red soil hilly areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (in Chinese), 2005, **21** (8): 181~183
- [8] 梁文举, 施春健, 姜勇. 长期定位试验地耕层土壤氮素空间变异性及其应用. 水土保持学报, 2005, **19** (1): 79~83
Liang Wenju, Shi Chunjian, Jiang Yong. Spatial variability of soil nitrogen in cultivated horizon and its application in a site-specific long-term experimental field. *Journal of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 2005, **19** (1): 79~84
- [9] 肖玉, 谢高地, 安凯. 土壤速效磷含量空间插值方法比较研究. 中国生态农业学报, 2003, **11** (1): 56~58
Xiao Yu, Xie Gaodi, An Kai. Comparison of interpolation methods for content of soil available phosphor. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (in Chinese), 2003, **11** (1): 56~58
- [10] 李晓燕, 张树文. 吉林省德惠市土壤速效钾的空间分异及不同插值方法的比较. 水土保持学报, 2004, **18** (4): 97~100
Li Xiaoyan, Zhang Shuwen. Spatial heterogeneity and comparison of different methods of interpolation of soil available K in Dehui city, Jilin Province. *Journal Soil and Water Conservation* (in Chinese), 2004, **18** (4): 97~100
- [11] 石小华, 杨联安, 张蕾. 土壤速效钾养分含量空间插值方法比较研究. 水土保持学报, 2006, **20** (2): 68~72
Shi Xiaohua, Yang Lianan, Zhang Lei. Comparison of spatial interpolation methods for soil available Kalium. *Journal of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 2006, **20** (2): 68~72
- [12] 胡克林, 李保国, 吕贻忠, 等. 非平稳型区域土壤汞含量的各种估值方法比较. 环境科学, 2004, **25** (3): 132~137
Hu Kelin, Li Baoguo, Lü Yizhong, et al. Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil mercury content. *Environmental Science* (in Chinese), 2004, **25** (3): 132~137
- [13] 王学军, 席爽. 北京东郊污灌土壤重金属含量的克里格插值及重金属污染评价. 中国环境科学, 1997, **17** (3): 225~228
Wang Xuejun, Xi Shuang. Kriging analysis and heavy metal pollution assessment for soil from eastern suburb of Beijing city. *China Environmental Science* (in Chinese), 1997, **17** (3): 225~228
- [14] 邱卫文, 王秋兵, 雷永振, 等. 铁岭凡河稻田土壤有效态中、微量元素空间变异特征研究. 土壤通报, 2004, **35** (6): 767~772
Qiu Weiwen, Wang Qiubing, Lei Yongzhen, et al. Study on spatial variability of soil available medium-microelements of paddy field in Fanhe township of Tieling county. *Chinese Journal of Soil Science* (in Chinese), 2004, **35** (6): 767~772
- [15] 苏伟, 聂宜民, 胡晓洁, 等. 农田土壤微量元素的空间变异及 Kriging 估值. 华中农业大学学报, 2004, **23** (2): 222~226
Su Wei, Nie Yimin, Hu Xiaojie, et al. The research on spatial variability of soil microelement and Kriging method. *Journal of Huazhong Agricultural University* (in Chinese), 2004, **23** (2): 222~226
- [16] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土有机碳空间异质性及其格局. 水土保持通报, 2005, **25** (3): 20~24
Fang Huajun, Yang Xueming, Zhang Xiaoping, et al. Spatial heterogeneity and pattern of black soil organic carbon of sloping field. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 2005, **25** (3): 20~25
- [17] 姜勇, 梁文举, 李琪. 利用与回归模型相结合的克里格方

- 法对农田土壤有机碳的估值及制图. 水土保持学报, 2005, **19** (5): 97~100
- Jiang Yong, Liang Wenju, Li Qi. Prediction and mapping of soil organic carbon in farmland using Kriging combined with regression. *Journal of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 2005, **19** (5): 97~101
- [18] 张世熔, 黄元仿, 李保国. 冲积平原区土壤颗粒组成的趋势效应与异向性特征. 农业工程学报, 2004, **20** (1): 56~60
- Zhang Shirong, Hua Yuanfang, Li Baoguo. Trend effect and anisotropy of soil particle composition in alluvial regions. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (in Chinese), 2004, **20** (1): 56~60
- [19] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 261~277
- Feng Jinming, Zhao Tianbao, Zhang Yingjuan. Intercomparison of spatial interpolation based on observed precipitation data. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 261~277