第 49 卷 第 5 期
2012 年 9 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 49, No. 5
Sep., 2012

温室气体排放量空间尺度扩展方法的误差来源分析

——以 CH4MOD 模型为例*

郭 淼[1] 逯超普[1] 蔡祖聪[2] 颜晓元[1†]

(1 中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)
(2 南京师范大学地理科学学院,南京 210046)

摘 要 在估算区域温室气体排放量时往往需要利用模型,从可验证的点的排放量扩展至区域排放总量,这一尺度扩展过程中会产生误差。为比较不同扩展方法的误差大小,本研究收集江苏省内稻麦轮作体系水稻田 59 个样点的与 CH_4 排放相关的信息,以 CH4MOD 模型模拟了 CH_4 排放,比较了以下种尺度扩展方法的结果:1)取区域内多个点的模型输入参数平均值,计算区域平均排放量;2)以区域内一个代表样点的参数输入模型,计算区域平均排放量。3)根据区域内各模型参数的统计学特征,随机生成 100 个虚拟点,以其输出结果的平均值为区域平均排放量,此为蒙特卡罗法。研究发现,以真实参数模拟计算的 59 个样点 CH_4 排放量均值作为基准,则第一和第二种方法的相对误差分别为 -19.60% 和 -19.74%,采用多点代面的蒙特卡罗法可将误差降低至 3.29%。对第一和第二种方法的误差来源进行了分析。

关键词 温室气体;模型模拟;尺度扩展;误差

中图分类号 X511 **文献标识码** A

随着全球气候变化越来越引起国际社会的高度重视,温室气体减排已成为公众关注的焦点话题。农业生产活动是人为源温室气体的主要排放源之一。据估计,农业源占我国温室气体排放总量的 17%[1]。农田温室气体排放量测定主要依赖于人工操作,长期连续观测成本高、难度大,且只能监测点尺度上的排放通量。然而,重大的生态环境问题往往在大尺度上发生,并在大尺度上管理或治理[2]。因此,根据点尺度上的测定结果,利用数学模型进行尺度扩展,进而计算大区域的温室气体排放总量,是一个必要的步骤。

空间尺度扩展方法主要分为两类:一类是单点代面法,如参数平均法[3]和代表性点法;一类是多点代面法,如蒙特卡罗方法。前者利用空间单元内已掌握的若干组模型参数,求出平均值或选出代表性值后输入模型计算,输出唯一的目标参数来代表空间单元的总体情况;后者则将若干组模型参数依次输入模型,输出相应数量的目标参数,用目标参数的平均值来代表空间单元的总体情况。目前,国际上第一类方法应用较多。然而,影响因素与温室气体排放量并非总是线性关系的,因此将参数算术平均可能产生较大的误差。本研究将探讨这两类方法的结果是否存在差异,并结合误差来源分析,选出较为合理的空间尺度扩展方法。

众所周知,CH_4 是一种重要的温室气体,对温室效应的相对贡献占所有温室气体的 19%,仅次于 CO_2[4]。在百年尺度上,单位质量 CH_4 的全球增温潜势是 CO_2 的 23 倍[5]。农业活动是 CH_4 最大的人为排放源,包括反刍动物肠道发酵(29.70%)和水稻种植(19.73%)等[6]。作为一个水稻大国,我国拥有占全球 22% 的水稻种植面积和 38% 的水稻产量,CH_4 排放占世界水稻田总排放量的 28% 左右[7-9]。因此,本研究以 CH_4 为例,探讨温室气体排放量空间尺度扩展方法的误差来源问题。

* 国家自然科学基金创新群体项目(40621001)资助

† 通讯作者,E-mail:yanxy@issas.ac.cn
作者简介:郭 淼(1986—),男,四川人,硕士研究生,主要从事土壤碳氮循环及其农业与环境效益研究。E-mail:guomiao@issas.ac.cn

收稿日期:2011-09-23;收到修改稿日期:2011-12-16

1　模型选择与数据来源

1.1　模型选择

随着对稻田 CH_4 排放机理的认识逐步深入，基于 CH_4 排放机理和统计结果的各种模型也相继问世，如李长生等[3,5]研发的 DNDC 模型，Bachelet 等[5,10]开发的统计模型，Matthews 和 Knox 等[11-12]开发的 MERES 模型。

本文选择黄耀等[13]开发的 CH4MOD 模型。该模型对覆盖中国主要水稻产区的 94 个甲烷排放观测案例进行了验证，是国际上目前唯一经过大样本检验的稻田 CH_4 模型[14-15]。CH4MOD 可以有效地模拟不同气候、土壤及农业管理下的稻田甲烷排放，具有广泛的适应性和很好的解释性。此外，该模型输入参数少且易于获得，基本输入参数包括土壤砂粒百分含量、水稻单产、水稻物候、外源有机物类型及施用量、水稻生长期逐日气温数据、稻田水分管理方式等[3]。CH4MOD 模型由 2 个子模块组成[5,16]：(1)甲烷基质供应子模块：模拟水稻植株根系分泌物的释放及外源有机物(包括前作残茬、作物秸秆、有机肥等)的分解过程；(2)甲烷产生与排放子模块：模拟 CH_4 的产生过程及通过水稻植株和气泡逸出的排放过程。

1.2　研究思路

以江苏省作为本研究的目标空间单元，以省内 59 个水稻田样点的各项参数为数据基础，选择经过验证的 CH4MOD 作为模型工具，首先将 59 组模型参数依次输入模型，得出 59 组模型参数相应的 CH_4 排放量，以其平均值作为江苏省稻田 CH_4 年均排放的基准值。其次，使用单点代面法：将 59 组模型参数通过求平均值和选择代表性值的方法，得出“参数平均点”和“代表性点”，分别输入模型，计算出两种单点代面法的估算结果。再次，根据 59 组模型参数的统计学特征，用蒙特卡罗的方法随机生成 100 组虚拟模型参数，输入模型计算后得到多点代面的蒙特卡罗方法计算结果。最后进行误差来源分析：将单点代面与多点代面方法的计算结果分别于基准值比较，得出各种计算方法的误差大小，并在此基础上用全省平均值或代表性值逐一替换各模型参数的原始值，探讨单点代面方法中各参数造成的误差大小。

1.3　数据来源

2007 年，在江苏各地采集了 59 个稻田土壤样本，分析了主要土壤理化属性。CH4MOD 模型所需要的这 59 个点的其他主要输入参数来源如下。

土壤砂粒百分含量：采样点砂粒含量来自中国 1∶100 万土壤数据库[17]。将采样点的经纬度坐标经投影转换后，与中国 1∶100 万土壤数据库进行叠加，检索出各点位的砂粒含量数据。水稻物候：参照常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站 2010 年水稻移栽、收获日期：于 6 月 10 日移栽，10 月 28 日收获。因水稻物候不是影响 CH_4 排放的主要参数，为避免因栽种日期不同对模拟结果造成不确定性影响，将其在全省范围内统一。外源有机物类型及施用量：本文所选择的研究区域为江苏省境内稻麦轮作体系的水稻田，为研究方便，将外源有机物类型统一设定为前茬小麦秸秆。根据江苏省农作习惯，考虑有 50% 的农户将前茬小麦秸秆全部还田；另外 50% 的农户不施加秸秆，但前茬小麦收割后有 10% 的秸秆留田。小麦秸秆量根据小麦产量乘以谷草比获得。参考江苏省 2009 年统计年鉴，小麦产量平均为 4 815 kg hm^{-2}，谷草比取值范围 0.8～1.2[18]，均值 1.0，均匀随机产生。气温数据：气温数据来自中国气象科学数据共享服务网，选用南京、东台、宝山、龙华、赣榆、潍坊、蚌埠、徐州 8 个国家级地面气象监测站点逐日气象数据，按照直线距离最近原则匹配给各采样点位。水分管理方式：根据江苏省农作习惯，约有 20% 的农户在水稻种植期连续淹水，约 60% 的农户中期烤田 1 次，约 20% 的农户烤田 2 次。

2　模型验证及敏感性分析

2.1　模型验证

为保证模型运行的可靠性，本研究收集了常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站稻麦轮作体系下麦秆不同施用量处理中所测定的稻田 CH_4 排放通量，并与模拟数据进行了对比，结果如表 1 所示。

模拟三种施肥处理模式时，除秸秆还田量不同，其他输入参数均保持一致。从表 1 可以看出，三种不同施肥处理模式下，模拟值和实测值的相对误差均小于 10%，说明 CH4MOD 模型能够较好地模拟常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站稻麦轮作体系水稻田 CH_4 排放情况。

为了进一步说明 CH4MOD 模型的拟合效果，我们对三种不同施肥处理模式下，水稻生长期内 CH_4 通量的日变化模拟值和实测值进行了相关性分析，

表 1 CH4MOD 模型验证

Table 1 Validation of the CH4MOD model

施肥处理 Treatment	小麦秸秆还田量 Straw application rate ($kg\ hm^{-2}$)	实测值 Measurement ($CH_4\ kg\ hm^{-2}$)	模拟值 Simulation ($CH_4\ kg\ hm^{-2}$)	相对误差 Relative error (%)
NPK	0	94	85.79	-8.73
NPK + straw1	2 250	160	170.9	6.83
NPK + straw2	4 500	267	255.5	-4.31

其皮尔逊相关系数(Person Correlation)分别为:0.669、0.644 和 0.588($n=36$),经相关系数显著性 t 检验,$p<0.01$,这表明三种不同施肥处理模式下模型模拟值与田间实测值具有相似的 CH_4 排放通量生长期变化趋势。再次证明了 CH4MOD 模型能够较好地模拟常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站稻麦轮作体系水稻田 CH_4 排放情况。

2.2 敏感性分析

对 CH4MOD 模型的各项输入参数进行敏感性分析,有利于对模型进行直观理解,从而筛选出对 CH_4 排放起决定性影响的主要因素,以便进行误差来源分析。

本文检验了砂粒含量、秸秆施用量、气象数据、中期烤田次数 4 项输入参数对 CH_4 排放量的敏感性。结果表明(图 1):CH_4 排量与砂粒含量、秸秆施用量呈显著的正相关关系,其中秸秆施用量与 CH_4 排量具有较为明显的直线线性关系;其他参数相同的条件下,选用相同时间段内,不同气象监测站的逐日气象数据,模拟结果的最大值与最小值之间具有 25.6% 的相对误差;烤田次数对 CH_4 排量的影响是决定性的,连续淹水条件下 CH_4 排量几乎是 1 次中期烤田的 2 倍,随着烤田次数增加,CH_4 排量逐渐减少。综上所述,考虑到模型对某项参数的敏感性、参数自身的可变性、参数间的相互影响,烤田次数是 CH4MOD 模型中影响 CH_4 排放的决定性因素。

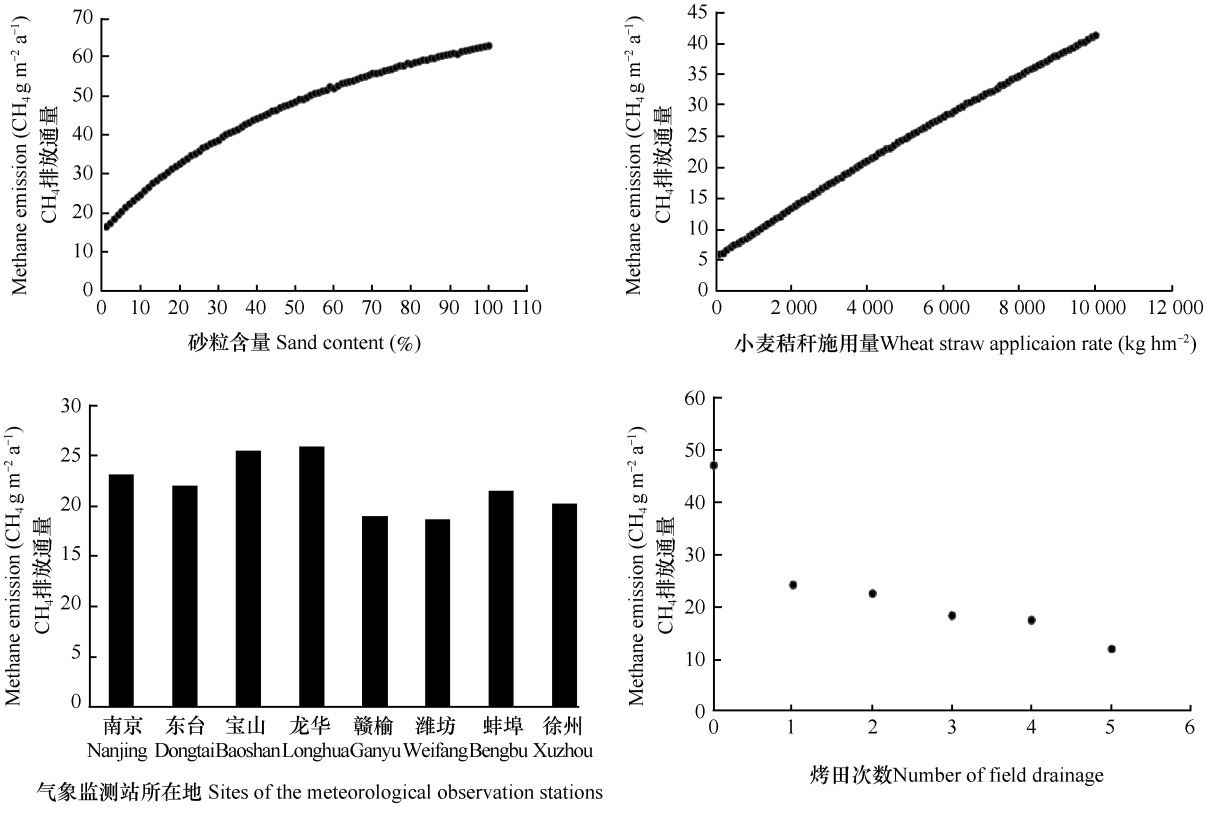

图 1 CH4MOD 各项输入参数与模型计算 CH_4 排放通量的关系

Fig. 1 Relationships of estimated CH_4 emission flux with various input parameters in calculation using the CH4MOD model

3　使用多个采样点数据直接计算江苏省稻田 CH_4 排放量

直接计算方法将空间单元内数量足够多的采样点的各项参数作为模型参数组，输入模型后计算出各个点的温室气体排放量，然后计算出全省平均排放量。在本研究中，将江苏省 59 个水稻田样点的数据逐一输入模型，计算出 59 个点的 CH_4 排量。因 CH4MOD 模型曾在常熟站得到较好的验证，故认为与常熟站具有相同耕作模式、相近土壤性质和气温环境的省内 59 个样点的 CH4MOD 模型计算结果可以接受。CH4MOD 模型计算所得 59 个点的 CH_4 排放量平均值为 331 kg hm^{-2}，以此作为比较的基准值（表 2）。

4　不同尺度扩展方法估算的稻田 CH_4 平均排量

现实情况下往往在一个区域内缺少有数量足够多的点的各项参数实测值，而只有这些参数的平均值和/或统计属性，或者是一些代表性点的各项参数值。此时需要用到一些尺度扩展方法来估算区域内的平均排放量。本研究中我们采用以下三种方法。

4.1　参数平均法

首先求出江苏全省 59 个样点砂粒含量、秸秆施用量平均值；其次，将省内及江苏省附近共 8 个气象监测站气温数据逐日平均，以其平均值作为江苏省逐日平均气温数据；最后，根据江苏省农作习惯，认为全省农户在水稻生长期平均烤田 1 次。将参数平均法的各项输入参数输入 CH4MOD 模型，计算出 CH_4 年均排放量为 266 kg hm^{-2}（表 2）。

4.2　代表性点法

本研究考虑到 CH4MOD 模型对各参数的敏感性，以及各参数本身的特性，选择砂粒含量最接近全省平均值的兴化点作为江苏省的代表性点，各项输入参数采用该点位原始值。其中，由于江苏省施加和不施加秸秆的农户各占 50%，选择其中任何一种施肥方式均会带来严重的误差，故选用全省秸秆施用量的平均值作为代表性值，代替兴化点的原始值。将代表性点的各项参数输入 CH4MOD 模型，计算出代表性点 CH_4 年均排放量 266 kg hm^{-2}（表 2）。

表 2　不同尺度扩展方法的对比分析

Table 2　Comparative analysis of different upscaling methods

尺度扩展方法 Scaling-up method	输入参数 Input parameters				输入方法 Input method	计算结果 Result（CH_4 kg hm^{-2} a^{-1}）	相对误差 Relative error（%）
	砂粒含量 Sand content（%）	秸秆施用量 Straw application rate（kg hm^{-2}）	气象数据 Daily meteorological data	烤田次数 Number of field drainage			
基准值 Reference value	各采样点原始值	各采样点原始值	各采样点原始值	各采样点原始值	多点输入：将 59 组模型参数输入模型，对相应的 59 个计算结果求平均	330.6	—
参数平均法 Average-parameter method	38.45	2 604	江苏省平均逐日气温	1	单点输入：将 59 个采样点各项参数先平均，以各参数的平均值为模型参数组，输入模型计算	266.1	-19.60
代表性点法 Typical-point method	37.9	2 604	东台气象监测站	1	单点输入：从 59 个采样点中选出代表性点，将其各项参数输入模型计算	265.6	-19.74
蒙特卡罗法 Monte Carlo method	各虚拟点的砂粒含量	各虚拟点的秸秆施用量	各虚拟点随机分配气象监测站	各点随机设置，保证 3 种烤田模式比例与实际情况一致	多点输入：按照 59 个采样点各项参数的统计学特征，随机生成 100 组模型参数，输入模型计算，对计算结果求平均	341.8	3.29

4.3 蒙特卡罗法

首先计算出全省 59 个样点砂粒含量的算术平均值和标准差,进而使用随机数发生器产生 100 个与全省采样点砂粒含量具有相同算术平均值和标准差的正态分布随机数,从而得到 100 个虚拟输入点的砂粒含量数据。采用同样方法,根据 59 个样点秸秆施用量的算数平均值和标准差,随机生成 100 个虚拟点秸秆施用量数据。其次,根据江苏省耕作习惯,约 20% 农户持续淹水、60% 农户烤田 1 次、20% 农户烤田 2 次。在 100 个虚拟输入点中按上述比例,随机设置 20 个点 0 次烤田、60 个点 1 次烤田、20 个点 2 次烤田。最后,将江苏省内及附近 8 个气象站的逐日气温数据随机分配给 100 个虚拟点,得到 100 个虚拟输入点的全部参数。将 100 个虚拟点分别输入 CH4MOD 模型,得到 100 个虚拟点的 CH_4 排放量,平均后得出 CH_4 年均排放量为 342 kg hm^{-2}(表 2)。

4.4 不同尺度扩展方法的对比分析

将上述 4 种方法的主要输入参数、输入方法、计算结果列至表 2 中。直接计算方法在每一个样点的计算结果均可检验,以其计算结果作为江苏省水稻田 CH_4 年均排放量的基准值。相对于基准值,不同的尺度扩展方法会造成不同的误差。参数平均法和代表性点法是目前国际上比较流行的空间尺度扩展方法,但其相对误差较大,分别达 -19.6% 和 -19.7%。

5 单点代面类尺度拓展方法的误差来源分析

5.1 砂粒含量带来的误差

探讨参数平均法中砂粒含量取平均值造成的误差时,首先求出全省 59 个样点砂粒含量的平均值为 38.45%,用平均值替换各点砂粒含量原始值,其他参数保持不变,得到砂粒含量统一为全省均值的 59 组模型参数。参数输入模型后,计算出 59 个 CH_4 排放量结果,其平均值为 355 kg hm^{-2}。相对于基准值 331 kg hm^{-2},砂粒含量取平均值造成了 7.17% 的相对误差。在代表性点法中,兴化点砂粒含量(37.9%)替换各样点砂粒含量的原始真实值,其他参数保持不变。新产生的 59 组输入参数输入模型,计算出砂粒含量取代表性点位值时 CH_4 年均排放量为 352 kg hm^{-2},造成了 6.32% 的相对误差。

5.2 秸秆施用量带来的误差

代表性点法和参数平均法中,秸秆施用量均采用了全省平均值 2 604 kg hm^{-2}。用这一数值替换掉各采样点原始值后,保持其他参数不变,得到新的 59 组输入参数。逐一输入模型计算后,得出秸秆施用量取平均值时 CH_4 年均排放量为 342 kg hm^{-2}。相对于基准值 331 kg hm^{-2},秸秆施用量造成了 3.39% 的相对误差。

5.3 气象数据带来的误差

参数平均法中,逐日气象数据为 8 个国家地面气象监测站逐日气温数据的平均值,用全省平均气象数据代替各点位原始气象数据,其他输入参数不变。将新得到的 59 组模型参数输入模型计算,得出 CH_4 年均排放量为 334 kg hm^{-2}。相对于基准值 331 kg hm^{-2},气象数据平均仅造成 0.80% 的相对误差。用代表性点法计算全省 CH_4 排放量时,由于 8 个国家地面气象监测站中的东台气象站与代表性点兴化点距离最近,使用该站监测的逐日气象数据代替 59 个样点原有气象数据,保持其他输入参数不变。59 组参数输入模型得出 CH_4 年均排放量为 334 kg hm^{-2}。气象数据引用代表性点位值造成了 1.00% 的相对误差。

5.4 烤田次数带来的误差

根据江苏省农作习惯,使用参数平均法和代表性点法时,中期烤田次数均设置为 1 次。两方法由烤田次数带来的误差一致。保持 59 个样点其他参数不变,烤田次数统一为 1 次。将新得到的 59 组模型参数依次输入模型计算获得 59 组结果,平均后得到 CH_4 年均排放量为 244 kg hm^{-2}。相对于基准值 331 kg hm^{-2},烤田次数统一为 1 次,造成了 -26.31% 的相对误差。

5.5 误差来源分析

参数平均法误差源于对各项输入参数的平均处理,而代表性点法误差源于用代表性点的各项参数值代替了 59 个样点各项参数的原始值。从表 3 中可以看出,烤田次数是两种方法造成误差的主要因素。结合模型敏感性分析研究可知,烤田次数造成排放量误差的主要原因是两者之间没有明显的线性关系。连续淹水条件下 CH_4 排放量是烤田 1 次的 2 倍,而烤田 2 次相对烤田 1 次仅有小幅降低。因此,用烤田 1 次来代表全省稻田水分管理措施,会低估全省稻田 CH_4 平均排放量。同时,由前文可知,各项输入参数对计算结果造成的相对误差正负不同,相互叠加后,最终两种空间尺度扩展方法造成的误差实际上是各参数相互作用下的累积误差。

表 3　不同尺度扩展方法中 CH4MOD 模型各主要参数造成的相对误差

Table 3　Relative errors caused by major parameters of CH4MOD in different upscaling methods(%)

尺度扩展方法 Upscaling method	砂粒含量 Sand content	秸秆施用量 Straw application rate	逐日气象数据 Daily meteorological data	烤田次数 Number of field drainage
参数平均法 Average-parameter method	7.17	3.39	0.80	-26.31
代表性点法 Typical-point method	6.32	3.39	1.00	-26.31

此外，参数平均法和代表性点法在计算原理上将空间单元看作单一的均质点，限制了各项输入参数只能选择唯一的取值。然而，现实中很多参数不能通过求平均值、或引用特定值来较好地代表全局，往往需要多次取值、多种输入方案配合才能进行较好的模拟。例如，很多模型要求输入“水田或旱地”，此时，使用参数平均法无法对类似的属性数据求平均；而使用代表性点法时，从两者中任选一种来代表整体均会产生较大的误差。由此可见，因为输入参数组过少，单点代面法不可避免会产生一些误差。

6　讨　论

前文对单点代面方法的误差来源进行了分析，事实上，在尺度扩展过程中，单点代面和多点代面两类方法各有优缺点。

单点代面方法，将空间单元看作均质的点，优点在于，对每个空间单元只需进行一次计算。当目标区域较大，空间单元数量较多时，单点代面法具有较高的计算效率。其不足之处是：(1)模型参数与输出结果间往往不是简单的线性关系，用参数的平均值或代表性值进行计算，会带来误差；(2)单点代面法在每个空间单元只具备一组模型参数，当遇到某参数无法用单一取值代替区域总体情况时，会产生误差；(3)单点代面法使用各参数的平均值或代表性值组成模型所需的输入参数组，这样的点在现实中并不存在，因此单点代面法的计算结果无法得到检验。

多点代面方法的优点在于：(1)避免了由于参数平均或取代表性值带来的误差；(2)避免了由于输入参数组过少带来的误差；(3)每组输入参数组在现实中均能找到与之对应的点，其计算结果可以得到检验；(4)得到多组输出结果后，不仅可以采用求平均值的方法来获得空间单元的总体情况，也可以采用多种数学方法灵活处理，从而提高模拟精度；(5)通过对多组输出结果进行分析，可得到输出结果在空间单元内的变异范围、统计学特征甚至空间分布特征，可能总结出新的科学规律。而多点代面法的缺点是，对每一个空间单元均需进行多次模型计算，降低了工作效率。

空间尺度扩展过程中，多点代面方法的优越性明显高于单点代面方法。随着计算机技术日新月异的发展，模型的计算速度也不断提高，多点代面方法将得到更多的关注和使用，进而逐步取代单点代面类方法，成为温室气体排放量空间尺度扩展的主要方法。

7　结　论

将 CH4MOD 模型计算结果与常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站水稻田实测结果对比，在不施秸秆和分别施加 2 250 kg hm^{-2}、4 500 kg hm^{-2}小麦秸秆三种施肥处理下，模拟结果与实测值之间相对误差均小于 10%；对水稻生长期内 CH_4通量的日变化模拟值和实测值进行了相关性分析，结果表明模拟值与实测值之间存在极显著的相关关系，模型验证较好。运用 CH4MOD 模型估算江苏省稻田 CH_4排放量的方法可行。

本研究发现，相对于基准值，单点代面的参数平均法和代表性点法分别会造成 -19.60% 和 -19.74% 的相对误差。误差产生的主要原因是此类方法输入点位数过少，当遇到输入参数与计算结果间不存在线性关系，或者无法使用单一数值代表空间单元的整体情况时，会产生较大的误差。

本研究中，代表性点法和参数平均法的计算结果较为接近，原因是秸秆用量同样使用了全省平均值，且东台气象监测站的模拟结果正好处于全省平均水平(图 1)。而在实际应用中，根据某一项输入参数选择的代表性点，该点的其他输入参数往往具

有很大的随意性,可能对结果造成较大的误差。例如,若本研究直接采用兴化点原有的秸秆用量数据,代表性点法的计算误差将高达 -57.93%。同样,若代表性点恰好引用了平均气温相对较低的赣榆气象监测站点逐日气温数据,即使其他参数不变,相对误差也将扩大至 -29.74%。可见,使用代表性点法估算区域温室气体排放量,具有极大的不确定性。

采用蒙特卡罗法,根据现有数据的统计学特征随机产生大量的虚拟输入点,能较好地解决单点代面法无法避免的缺陷。与基准值比较,本研究中蒙特卡罗法造成的相对误差仅为 3.29%,能够较好地反映空间单元的实际情况。因此,相对于单点代面法,蒙特卡罗法能明显降低空间尺度扩展带来的误差,该方法值得借鉴。

参 考 文 献

[1] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269—273. Dong H M, Li Y E, Tao X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 269—273

[2] 李长生. 生物地球化学的概念与方法——DNDC 模型的发展. 第四季研究, 2001, 21(2): 90—99. Li C S. Biogeochemical concepts and methodologies: Development of the DNDC model (In Chinese). Quaternary Sciences, 2001, 21(2): 90—99

[3] Li C S, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(1): GB1043, doi: 10.1029/2003GB002045

[4] Bouwman A F. Soils and the greenhouse effect. Chichester: John Wiley and Sons, 1990: 25—32

[5] 黄耀, 张稳, 郑循华, 等. 基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计. 生态学报, 2006, 26: 980—988. Huang Y, Zhang W, Zheng X H, et al. Estimates of methane emission from Chinese rice paddies by linking a model to GIS database (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 980—988

[6] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策. 第四季研究, 2006, 26(5): 722—732. Huang Y. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy (In Chinese). Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 722—732

[7] 张黎明, 于东升, 史学正, 等. 基于不同土壤数据单元法的 DNDC 模型对太湖地区水稻土 CH_4 排放模拟研究. 环境科学, 2009, 30(8): 2 186—2 192. Zhang L M, Yu D S, Shi X Z, et al. Simulation of methane emissions from rice fields in the Taihu Lake Region, China by using different unit of soil database with the DNDC model (In Chinese). Environmental Science, 2009, 30(8): 2 186—2 192

[8] 江长胜, 王约思, 郑循华, 等. 稻田 CH_4 排放影响因素及其研究进展. 土壤通报, 2004, 35(5): 663—669. Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, et al. Advances in the research on methane emission from paddy fields and its affecting factors (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(5): 663—669

[9] 王明星, 戴爱国, 黄俊, 等. 中国 CH_4 排放量的估算. 大气科学, 1993, 17(1): 52—64. Wang M X, Dai A G, Huang J, et al. Sources of methane in China: Rice fields, agricultural waste treatment, cattle, coal mines, and other minor sources (In Chinese). Scientia Atmospherica Science, 1993, 17(1): 52—64

[10] Bachelet D, Kern J, Tolg M. Balancing the rice carbon budget in China using a spatially-distributed data. Ecological Modeling, 1995, 79: 167—177

[11] Knox J W, Matthews R B, Wassmann R. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia Ⅲ. Databases. Nutrient Cycling Agroecosystems, 2000, 58 (1/3): 179—199

[12] Matthews R B, Wassmann R, Knox J W, et al. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia IV. Upscaling to national levels. Nutrient Cycling Agroecosystems, 2000, 58 (1/3): 201—217

[13] Huang Y, Sass R L, Fisher F M. A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils. Global Change Biol, 1998, 4: 247—268

[14] Huang Y, Zhang W, Zheng X H, et al. Modeling methane emission from rice paddies with various agricultural practices. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: D08113, doi: 10.1029/ 2003JD004401

[15] Zhang W, Huang Y, Zheng X H, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model validation. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2 679—2 685

[16] Zhang W, Huang Y, Zheng X H, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model and modification. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2 347—2 352

[17] Shi X Z, Yu D S, Pan G X, et al. Soil database of 1∶1 000 000 digital soil survey and reference system of the Chinese Genetic Soil Classification System. Soil Survey Horizons, 2004, 45(4): 111—148

[18] 张培栋, 杨艳丽, 李光全, 等. 中国农作物秸秆能源化潜力估算. 可再生能源, 2007, 25(6): 80—83. Zhang P D, Yang Y L, Li G Q, et al. Energy potentiality of crop straw resources in China (In Chinese). Renewable Energy Resources, 2007, 25(6): 80—83

SOURCES OF ERRORS IN SPATIAL UPSCALING OF GREENHOUSE GAS EMISSION FROM SOIL —A CASE STUDY OF CH4MOD MODEL

Guo Miao[1]　Ti Chaopu[1]　Cai Zucong[2]　Yan Xiaoyuan[1†]

(1 *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing*　210008, *China*)

(2 *School of Geography Science*, *Nanjing Normal University*, *Nanjing*　210046, *China*)

Abstract　Models are often used to estimate regional greenhouse gas emissions by scaling up verified point data to a region, and errors may arise in this spatial up-scaling process. To compare the error sizes of different up-scaling methods, we collected input data of 59 sites required by CH4MOD in Jiangsu Province of China to simulate CH_4 emission from rice paddies, and applied three upscalling methods: 1) Take the average of all input parameters of 59 sites as the input parameters to model, then calculate the regional CH_4 emission, which is average-parameter method; 2) Apply the parameters of one representative sample site to the model, and extend the estimation directly to the regional scale, which is typical-point method; 3) Generate 100 virtual sites randomly according to the statistical characteristics of the parameters of 59 samples, then input them to run the model 100 times and get the average of simulated results as the regional CH_4 emission, which is the Monte Carlo method. The results showed that, when compared with the average of simulated results of the 59 individual sites, the average-parameter method and the typical-point method have a relative error of −19.60% and −19.74%, respectively, whereas the Monte Carlo method can effectively reduce the relative error to 3.29%. We also analyzed the error sources of average-parameter method and the typical-point method.

Key words　Greenhouse gas; Model simulation; Spatial upscaling; Error