

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

张黎明^{1,2}, 于东升^{1*}, 史学正¹, 赵莉敏^{1,2}, 丁维新¹, 王洪杰¹, 潘剑君²

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 利用农业土壤痕量气体排放模型 DNDC (DeNitrification-DeComposition), 以整个太湖地区 37 个县 234 万 hm^2 水稻土为例, 分析了 3 种不同土壤数据单元法对 CH_4 排放模拟的影响。其中, 1:5 万图斑单元法土壤属性来自 1:5 万土壤数据库, 图斑为最小模拟单元; 1:5 万“县级”单元法土壤属性也取自 1:5 万土壤数据库, “县”为最小模拟单元; 1:1 400 万“县级”单元法土壤属性取自国内同类研究使用最多的 1:1 400 万土壤图和《中国土种志》, “县”为最小模拟单元。结果表明, 虽然 1:5 万图斑单元法大多数县的 CH_4 排放量都在 1:5 万“县级”单元法最大与最小值范围之内, 但整个地区总排放量 (以 C 计, 下同) 相差达到 1 680 Gg; 而 1:1 400 万“县级”单元法 CH_4 排放量与 1:5 万图斑单元法相比, 尽管整个地区总排放量只相差 180 Gg, 但各“县级”单元之间的估算差异却很大, 这一方面说明了土壤数据的详细程度是保证地球生物化学模型模拟精度的重要因子, 另一方面也说明在区域 CH_4 排放量估算模拟中使用更详细的土壤资料是非常必要的。

关键词: 不同土壤数据单元; CH_4 ; DNDC; 太湖地区; 水稻土

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2185-08

Simulation of Methane Emissions from Rice Fields in the Taihu Lake Region, China by Using Different Unit of Soil Database with the DNDC Model

ZHANG Li-ming^{1,2}, YU Dong-sheng¹, SHI Xue-zheng¹, ZHAO Li-min^{1,2}, DING Wei-xin¹, WANG Hong-jie¹, PAN Jian-jun²

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Application of a biogeochemical model, DeNitrification and DeComposition or DNDC, was discussed to assess the impact of CH_4 emissions on different soil database from rice fields in Taihu Lake region of China. The results showed that CH_4 emissions of the polygon-based soil database of 1:50 000, which contained 52 034 polygons of paddy soils representing 1 107 paddy soil profiles extracted from the latest national soil map (1:50 000), were located within the ranges produced by the county-based soil database of 1:50 000. However, total emissions of the whole area differed by about 1 680 Gg CH_4 -C. Moreover, CH_4 emissions of the polygon-based soil database of 1:50 000 and the county-based soil database of 14 000 000, which was the most popular data source when DNDC model was applied in China, have a big estimation discrepancy among each county-based unit in spite of total emissions of the whole area by a difference of 180 Gg CH_4 -C. This indicated that the more precise soil database was necessary to better simulate CH_4 emissions from rice fields in Taihu Lake region using the DNDC model.

Key words: different unit of soil database; methane; DeNitrification-DeComposition (DNDC); Taihu Lake region; paddy soil

中国是重要的水稻生产国, 水稻种植面积和产量约占世界水稻的 22% 和 38%, CH_4 排放占世界水稻田总排放量的 28%^[1,2]。因此研究中国主要水稻生产区不同时期水稻田在特定农业生产条件下排放的 CH_4 气体排放量及其空间分布特征, 对全球温室效应评估和区域生态环境保护决策制定具有现实意义。目前, 利用模型开展农田 CH_4 排放及其区域空间格局模拟已成为国内外研究的热点^[3~6]。其中, DNDC (DeNitrification-DeComposition) 模型在农业土壤 CH_4 排放模拟方面较为成熟^[7~9]。我国很多学者

也借助 DNDC 模型和不同土壤属性资料开展了国家和区域尺度上的研究工作^[10~14]。

但从目前的研究来看, 我国的 DNDC 模型国家尺度模拟中土壤属性数据大多来自于 1:1400 万土壤图和《中国土种志》, 在区域模拟中一般使用的也

收稿日期: 2008-10-12; 修订日期: 2009-01-14

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目 (40621001); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2007CB407206); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (ISSASIP0715)

作者简介: 张黎明 (1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为全球变化与 GIS 应用, E-mail: lmzhang_1979@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dshyu@issas.ac.cn

是土壤信息相对比较粗糙的省级土种志资料;有研究表明在区域特定的管理条件下,土壤属性空间异质性是造成温室气体估算不确定性最主要的来源^[9,15].因此,在国家或区域尺度模拟中使用更详细的土壤资料,并对不同土壤数据源造成的模拟误差进行评估是非常必要的.为此,本研究通过应用DNDC模型,以整个太湖地区37个县的234万hm²水稻土为例,分析了3种不同土壤属性详尽程度的数据单元法对CH₄排放模拟的影响,以便为定量估算生物地球化学过程模型的模拟精度和不确定性评价提供参考依据.

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

太湖地区位于东经118°50′~121°54′,北纬29°56′~32°16′,面积约36 500 km²(图1),包括江苏省镇江、无锡、常州和苏州,浙江省嘉兴、湖州和杭州市的一部分,以及整个上海市,共37个县(市).该流域地形特点为周边高、中间低.气候温和湿润,雨量充沛,属北亚热带湿润季风气候,多年平均气温为15~16℃,年平均降水量在1 100~1 400 mm之间.平原区的成土母质以湖(河、海)相沉积物为主,沿江主要是长江冲积物,而丘陵地区则为各种岩石的残坡积物及下蜀黄土.太湖地区水稻种植始于6 000 a之前,水稻土分布广泛,剖面发育较好,总面积230多万hm²,占该地区土壤总面积的66%.水稻土亚类可包括渗育型水稻土、漂洗型水稻土、脱潜型水稻土、淹育型水稻土、潜育型水稻土和潜育型水稻土,被认为是“长江中下游水稻土区中的一个典型”^[16].

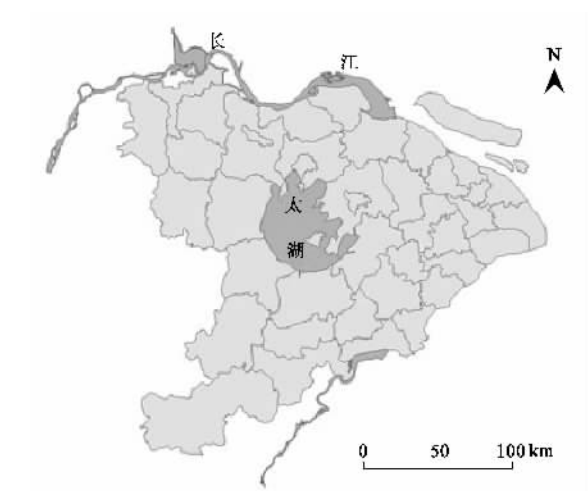


图1 太湖地区地理位置示意

Fig.1 Geographical location of the study area

1.2 DNDC模型简介

DNDC(DeNitrification-DeComposition)模型是美国New Hampshire大学发展起来的,目标是模拟农业生态系统中碳和氮的生物地球化学循环,时间步长以日为单位,是目前国际上最为成功的模拟生物地球化学循环的模型之一^[9,11,17~19].模型由6个子模型构成,分别模拟土壤气候、农作物生长、有机质分解、硝化、反硝化和发酵过程,这些过程描述了土壤碳氮的产生、分解和转化,最后给出土壤有机碳各组分动态含量和CO₂、N₂O、CH₄、NO、N₂等温室气体通量.运行模型的输入数据包括逐日气象数据(气温及降水)、土壤性质(容重、质地、初始有机碳含量及酸碱度)、土地利用(农作物种类和轮作)和农田管理(翻耕、施肥、灌溉、秸秆还田比例和除草等).该模型是对土壤碳、氮循环过程进行全面描述的机制模型,适用于点位和区域尺度的各种气候带的农业生态系统.

1.3 数据基础

太湖地区1:5万土壤数据库.土壤类型空间数据库有71 763个图斑,其中,水稻土图斑共计52 034个,约占总图斑数的73%;图斑的属性数据来源于各县土壤志,共有1 107个水稻土剖面数据.土壤属性和空间数据连接与融合采用“土壤类型GIS连接法”^[20].太湖地区1:1 400万土壤数据库由美国New Hampshire大学李长生老师提供,土壤属性数据来源于《中国土种志》.作物种类和农业数据库,包括太湖地区水稻田稻麦轮作系统中作物的有关生理参数,以及播种期、收获期、最大产量等种植制度参数;还包括各县1982~2000年的氮肥施用量、牲畜头数和农业人口数.气象资料,包括太湖地区13个气象台站1982~2000年的逐日最高气温和最低气温、日照时数、降水量等数据,各县采用距离最近的气象站点资料.

1.4 DNDC模拟方法和参数设置

在本研究中,对DNDC进行3种不同土壤数据源的模拟:①以1:5万土壤图水稻土图斑为最小模拟单元,各单元土壤属性数据(包括容重、粘粒、有机碳含量及pH)作为模型模拟的起始值,整个太湖地区有52 034个水稻土图斑,DNDC模型共需要运行52 034次(1:5万图斑单元法);②以模型常用的“县”作为最小模拟单元进行模拟,土壤质地、pH、容重和有机碳属性最小和最大值仍来自于1:5万土壤数据库,太湖地区共有37个“县级”模拟单元,每个模拟单元以土壤属性最大和最小值各模拟1次,共模拟

74 次,并取模拟结果最大值和最小值的“平均值”代表该县 CH₄ 排放量,各县的面积以 1:5 万土壤图统计面积为准(1:5 万“县级”单元法);③以模型常用的“县”作为最小模拟单元进行模拟,土壤质地、pH、容重和有机碳属性最大和最小值来自于目前国内同类研究使用最多的全国 1:1 400 万土壤图和《中国土种志》资料,太湖地区共有 37 个“县级”模拟单元,每个模拟单元以土壤属性最大和最小值各模拟 1 次,共模拟 74 次,并取模拟结果最大值和最小值的“平均值”代表该县 CH₄ 排放量,各县的面积以 1:5 万土壤图统计面积为准(1:1 400 万“县级”单元法)。

本研究中影响土壤碳氮循环的其它重要参数设置如下^[12,21]:①按常规假设所施氮肥中 40% 为尿素 [CO(NH₂)₂]、40% 碳铵 (NH₄HCO₃) 和 20% 磷铵 [(NH₂)₂H₂PO₄], 以此去分配施氮总量;②根据中国农业部 1997 年调查表明,全国作物秸秆还田比例为 15% 左右,以此假设太湖地区除去籽粒后地上部分秸秆还田比例为 15%,根茬全部还田;③人畜粪便是农田中有机碳氮的重要来源,结合调查,假设该地区有 20% 畜禽粪便和 10% 的人粪便均匀地还到所有农田中;④在水稻生长阶段间歇性灌水(浅灌)为主,烤田 1 次;⑤太湖地区稻麦轮作中,1990 年以前每年耕作 2 次,即水稻耕种前翻地 20 cm,小麦耕种前翻地 10 cm,1991 年以后大部分地区基本实现稻茬免耕种麦。

1.5 不同土壤数据单元法下 CH₄ 排放量的相对偏差(%)计算

为了更好地说明 3 种土壤数据单元法对 DNDC 模型对 CH₄ 排放模拟的影响,本研究使用相对偏差(%)来表示各方法之间 CH₄ 排放量的差异大小:

y = (x_s - x_0) / x_0 * 100%

式中, y 为相对偏差(%); x_s 为 1:5 万或 1:1 400 万“县级”单元土壤数据库模拟的 CH₄ 最大最小值的平均排放量; x₀ 为土壤数据更为详尽的 1:5 万图斑单元数据库模拟的 CH₄ 排放量。

1.6 1:5 万县级图斑单元法土壤属性计算

为了便于与 1:5 万“县级”单元法和 1:1 400 万“县级”单元法的 CH₄ 排放最敏感的土壤粘粒含量进行比较^[10], 1:5 万图斑单元法代表整个县的粘粒含量(%)用下式进行计算:

粘粒(%) = Σ (P_i * S_i / S_t)

式中, n 为整个县的图斑数, P_i 为太湖地区某县的某一图斑的粘粒含量(%), S_i 该图斑的面积(hm²), S_t 为整个县的面积(hm²), 1:5 万图斑单元法其它县级土壤粘粒含量计算以此类推。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

为了保证模型应用的可靠性,本研究收集了目前各部门在太湖地区所测定的 CH₄ 排放通量(见表 1), 并与模拟数据进行了比较。

从已有的观测结果可以看出(表 1), 太湖地区水稻田生态系统的 CH₄ 排放量基本在 10 ~ 320 kg·(hm²·a)⁻¹ 之间, 而本研究 1:5 万图斑单元法模拟的 87% 地区排放量都在此范围内(见图 2)。

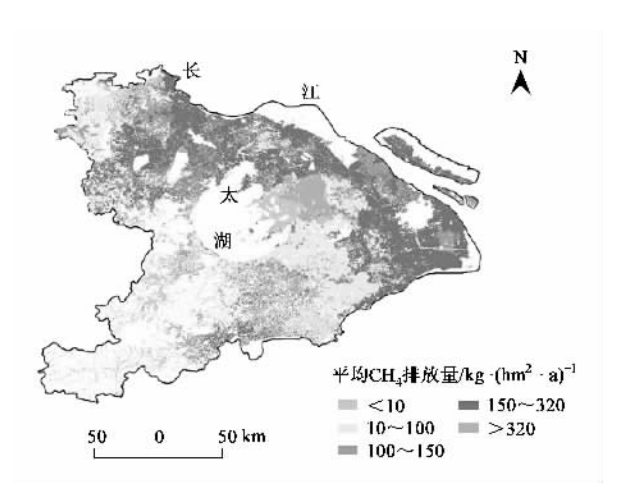


图 2 1:5 万图斑单元法太湖地区 CH₄ 的 19 a 平均年排放量
Fig.2 Average CH₄ flux per year of the polygon-based soil database of 1:50 000 in Taihu Lake region, China

从表 2 中 Cai 等^[18]、康国定等^[31]和王效科等^[32]对太湖地区不同县(市)水稻田 CH₄ 模拟值和实测值比较可以看出,模拟估算的 CH₄ 排放量“平均值”在实测数据的 71% ~ 111% 之间,这说明 DNDC 模型估算太湖地区水稻田土壤 CH₄ 的误差 < 10%, 大范围平均后,其误差将更小。

为了更进一步保证模型应用的可靠性,本研究对太湖地区句容、苏州和江宁的 CH₄ 排放量也进行了原位验证,相关不同观测点的管理措施见文献[26, 33]. 从表 3 可以看出,除江宁的实测值和模拟值相对误差达到 29.4% 以外,其他地区的相对误差都小于 10%, 这说明应用 DNDC 进行太湖地区水稻田 CH₄ 排放模拟是可靠的。

表 1 太湖地区水稻田 CH₄ 排放量

Table 1 CH₄ emission from rice field of Taihu Lake region in China

地点	观察 年份	施肥及施肥量(N) /kg•hm ⁻²	平均排放量 /kg•(hm ² •a) ⁻¹	文献
杭州浙江大学农场土壤有机质 2.5%	1988	—	160	[22]
			320	
江宁县土壤有机质 2.3%	1990 ~ 1992	尿素 100 + 厩肥	260	[23]
		厩肥	228	
		硫酸铵 140	63	
		尿素 100 + 厩肥, 半旱作	159	
吴县土壤有机质 3.2%	1992 ~ 1993	不施肥	163	[24]
		硫酸铵 223	98	
		硫酸铵 223 + 有机肥	180	
		硫酸铵 223 + 硝化抑制剂	132	
		硫酸铵 223, 连续淹水	191	
江苏省农科院土壤有机质 1.9%	1994	对照	79	[25]
		硫酸铵 100	46	
		硫酸铵 300	32	
		尿素 100	74	
		尿素 300	68	
句容土壤有机质 0.98%	1995	对照	18	[26]
		秸秆 + 氮肥 100	22	
		秸秆 + 氮肥 200	15	
		秸秆 + 氮肥 300	19	
		秸秆 + 氮肥 200	13	
吴县土壤有机质 3.5%	1994 ~ 1995	碳酸氢铵	245	[27]
		尿素 191 + 堆肥	219	
吴县土壤有机质 3.5%	1994 ~ 1996	尿素 191	110	[28]
		碳酸氢铵 191	70	
江宁县土壤有机质 3.02%	2001	(碳铵 + 尿素 + 复合肥) 333	39	[29]
		(碳铵 + 尿素 + 复合肥) 333 + 菜饼	137	
		(碳铵 + 尿素 + 复合肥) 333 + 秸秆	136	
		(碳铵 + 尿素 + 复合肥) 333 + 猪厩肥	57	
		(碳铵 + 尿素 + 复合肥) 333 + 牛厩肥	37	
江苏省农科院土壤有机质 1.7%	2003	尿素 300	52	[30]

表 2 太湖地区 CH₄ 的 DNDC 模拟结果和实测结果比较¹⁾

Table 2 Comparison between observed and DNDC-modeled CH₄ fluxes from rice field in Taihu Lake region, China

实测点	年份	实测值 /kg•(hm ² •a) ⁻¹	模拟值 /kg•(hm ² •a) ⁻¹	相对误差/%	文献
南京	1994	32.0 ~ 74.0(53.0)	47.0 ~ 69.0(58.0)	9.4	[32]
江宁	1990 ~ 1992	63.1 ~ 260.0(161.5)	100.1 ~ 193.1(146.5)	- 9.3	
吴县	1992 ~ 1996	70.0 ~ 191.1(130.5)	71.1 ~ 124.0 (97.5)	- 25.2	
杭州	1987 ~ 1989	160.0 ~ 320.0(240.0)	198.0 ~ 329.1(263.5)	9.8	
南京	1994	77.1	55.1	- 28.6	[18, 31]
句容	1995	19.1	19.6	3.2	
句容	1997	66.0	73.3	11.1	
吴县	1993	163.1	163.9	0.6	
吴县	1993	191.1	202.4	9.8	

1) 括号内的数据为实测或模拟估算范围的平均值

2.2 不同土壤数据单元法下的太湖地区水稻土 CH₄ 排放特征

从不同土壤数据单元法下太湖地区水稻土 CH₄

估算的差异来看(见表 4), 虽然 3 种方法对大多数县(市)CH₄ 排放量的估算都有相同的趋势, 但排放量之间还是存在较大差异. 太湖地区共有水稻土

234 万 hm², DNDC 模拟估算出的 1:5 万图斑、1:5 万“县级”和 1:1 400 万“县级”3 种不同土壤数据单元法下 1982 ~ 2000 年 CH₄ 净总排放量(以 C 计,下同)分别为 5 670 Gg、3 990 (2 150 ~ 5 830) Gg 和 5 890 (3 060 ~ 8 720) Gg.

从表 4 可以看出,虽然 1:5 万图斑单元法大多数县的 CH₄ 排放量都在 1:5 万“县级”单元法最大与最小值范围之间,但由于 1:5 万“县级”单元法没有充分考虑县内不同土壤类型的面积权重及土壤属性空间异质性,整个地区最大最小的平均总排放量与

表 3 本研究中太湖地区 CH₄ 的 DNDC 模拟结果和实测结果比较

Table 3 Comparison between observed and DNDC-modeled CH₄ fluxes from rice field in this study in Taihu Lake region, China

实测点	年份	容重 /g·cm ⁻³	pH	有机碳 /g·kg ⁻¹	粘粒 /%	实测值 /kg·(hm ² ·a) ⁻¹	模拟值 /kg·(hm ² ·a) ⁻¹	相对误差 /%
句容 31°56'N, 119°09'E	1997	1.14	6.3	5.7	29.1	66.0	66.4	-0.6
苏州 32°18'N, 121°21'E	1993	1.15	6.5	23.0	28.7	163.1	156.4	-4.2
江宁 31°52'N, 118°50'E	2000	1.14	6.7	19.4	49.0	30.4	22.8	-29.4

表 4 不同土壤数据单元法下的太湖地区水稻土 CH₄ 排放总量(以 C 计)/Gg

Table 4 Total CH₄ emissions of the different method of soil data unit from rice fields in Taihu Lake region, China/Gg

县名	1:5 万图斑法	1:5 万县级单元法			1:1 400 万县级单元法		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
张家港	87	90	84	87	72	2.7	37
常熟	222	242	88	165	219	7.5	113
太仓	180	205	52	128	227	6.6	117
昆山	115	223	6.2	114	272	8.3	140
吴县	818	160	6.0	83	421	10	215
吴江	86	175	2.9	89	319	10	165
无锡	224	221	96	159	271	6.4	139
江阴	189	228	206	217	299	269	284
武进	654	508	489	499	505	410	458
金坛	256	185	179	182	192	165	179
溧阳	214	273	227	250	1 179	257	718
宜兴	187	267	3.6	135	261	6.3	134
丹徒	54	127	2.7	65	133	127	130
句容	83	137	61	99	169	7.4	88
丹阳	172	243	5.4	124	291	286	289
嘉兴	92	140	2.8	71	780	183	481
嘉善	37	81	2.6	42	131	4.3	68
平湖	72	112	3.8	58	165	155	160
海盐	26	57	1.2	29	94	92	93
海宁	45	90	1.8	46	128	122	125
桐乡	77	86	1.8	44	133	4.0	69
湖州	92	124	20	72	152	2.8	77
长兴	62	61	1.7	31	116	2.9	59
安吉	7.4	12	1.0	6.5	5.3	0.33	2.8
德清	41	69	33	51	70	1.7	36
余杭	109	135	4.8	70	150	2.9	77
临安	3.3	3.6	1.8	2.7	3.1	0.035	1.6
闵行	128	132	3.8	68	139	138	139
嘉定	124	189	4.9	97	168	167	168
川沙	149	153	65	109	144	106	125
南汇	114	141	67	104	153	114	134
青浦	238	225	87	156	213	6.2	110
松江	167	197	86	140	223	6.4	115
金山	186	145	58	102	191	5.7	99
奉贤	202	218	98	158	252	206	229
宝山	66	80	2.4	41	87	75	81
崇明	92	97	93	95	390	85	237

土壤数据更为详尽 1:5 万图斑单元法估算的 CH₄ 排放总量相差达到1 680 Gg, 相对偏差为 - 29.43% . 1:1 400万“县级”单元法虽然在整个地区的最大最小平均 CH₄ 总排放量(以 C 计)与 1:5 万图斑单元法相比只相差 180 Gg, 但各“县级”单元之间的估算差异却很大. 其中, 吴县、溧阳、嘉兴和海盐都相差 2.0 倍以上, 张家港、常熟、丹徒、平湖、海宁、安吉、临安、青浦和崇明的差异也大于 1.0 倍, 只有 17 个县之间的差异小于 0.5 倍.

图 3 为 1:5 万和1:1 400万“县级”单元法平均值与 1:5 万图斑单元法 CH₄ 排放量为基准的相对偏差柱状图. 可以看出, 1:5“县级”单元方法的相对偏差相对较小, 除吴县 1:5 万图斑单元法估算的 CH₄ 排

放量为 820 Gg, 1:5 万“县级”单元法估算的 CH₄ 排放量仅为 83 Gg, 二者相差 730 Gg, 相对偏差达到 90% 以外, 其它大多数县之间的相对偏差都小于 40%, 而 1:1 400万“县级”单元法的相对偏差在太湖地区大多数县(市)都很高, 其中相对偏差最大的也是嘉兴, 1:5 万图斑单元估算的 CH₄ 排放量仅为 92 Gg, 1:1 400万“县级”单元估算的 CH₄ 排放量为 480 Gg, 二者相差 388 Gg, 相对偏差达到 420%, 其次是溧阳、丹徒、平湖、海盐和海宁, 相对偏差都大于 100%, 其它大多数县的相对偏差也都在 40% 以上, 仅有 7 个县的相对偏差 < 20%, 这种分布规律与 CH₄ 排放影响最大的土壤粘粒含量的分布规律相一致(见表 5)^[10]. 从表 5 可以看出, 1:5 万图斑单元法

表 5 不同土壤数据单元法下的太湖地区不同县水稻土粘粒含量分布/%

Table 5 Distribution of clay content of the different method from rice fields in Taihu Lake region, China/%							
县名	1:5 万图斑法	1:5 万县级单元法			1:1 400 万县级单元法		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
吴县	41	47	26	37	60	8.0	34
张家港	28	32	5.0	19	45	5.0	25
常熟	25	34	9	22	45	5.0	25
太仓	33	42	23	33	45	5.0	25
昆山	35	44	22	33	45	5.0	25
吴江	36	58	17	38	45	5.0	25
无锡	28	34	14	24	60	8.0	34
江阴	13	25	8.0	17	10	5.0	7.5
武进	9.4	13	4.0	9.0	10	8.0	9.0
金坛	8.6	13	4.0	9.0	10	8.0	9.0
溧阳	10	12	7.0	10	5.0	1.0	3.0
宜兴	27	53	10	32	60	8.0	34
丹徒	36	49	12	31	10	5.0	7.5
句容	30	38	15	27	45	8.0	27
丹阳	29	53	16	35	10	5.0	7.5
嘉兴	34	56	20	38	5.0	1.0	3.0
嘉善	39	44	22	33	45	5.0	25
平湖	35	43	22	33	10	5.0	7.5
海盐	40	52	22	37	10	5.0	7.5
海宁	36	52	19	36	10	5.0	7.5
桐乡	30	52	20	36	45	5.0	25
湖州	30	42	7.0	25	60	5.0	32.5
长兴	31	47	9.0	28	60	8.0	34
安吉	22	42	12	27	60	8.0	34
德清	32	38	18	28	60	5.0	32.5
余杭	4.6	48	16	32	60	5.0	32.5
临安	22	29	8.0	19	60	5.0	32.5
闵行	26	46	17	32	10	5.0	7.5
嘉定	28	44	13	29	10	5.0	7.5
川沙	29	36	17	27	20	5.0	12.5
南汇	31	35	8.0	22	20	5.0	12.5
青浦	27	36	11	24	45	5.0	25
松江	26	37	8.0	23	45	5.0	25
金山	29	36	18	27	45	5.0	25
奉贤	25	38	19	29	10	8.0	9.0
宝山	23	44	8.0	26	10	5.0	7.5
崇明	17	29	15	22	5.0	1.0	3.0

- [13] 韩冰,王效科,欧阳志云,等. 中国东北农田生态系统中碳库的分布格局及其变化[J]. 土壤通报,2004,**35**(4):401-407.
- [14] 李虎,王立刚,邱建军. 黄淮海平原河北省范围内农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放量的估算[J]. 应用生态学报,2007,**18**(9): 1994-2000.
- [15] Pathak H, Li C S, Wassmann H. Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model [J]. Biogeosciences, 2005, **2**: 113-123.
- [16] 徐琪,陆彦椿,刘元昌,等. 中国太湖地区水稻土[M]. 上海: 上海科学技术出版社,1980.37-80.
- [17] Li C S, Qiu J J, Frolking S, *et al.* Reduced methane emissions from large-scale changes in water management in China's rice paddies during 1980-2000 [J]. Geophys Res Lett, 2002, **29**: GB 1972, doi: 10.1029/ 2002 GL015370.
- [18] Cai Z C, Sawamoto S, Li C S, *et al.* Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emissions in East Asian cropping systems [J]. Glob Biogeochem Cycles, 2003, **18**: GB1043, doi:10.1029/ 2003GB00 2045.
- [19] Li C S, Salas W, DeAngelo B, *et al.* Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years [J]. J Environ Qual, 2006, **35**: 1554-1565.
- [20] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, *et al.* Soil database of 1:1,000,000 digital soil survey and reference system of the Chinese Genetic Soil Classification System [J]. Soil Surv Horizons, 2004, **45**: 129-136.
- [21] 邱建军,王立刚,唐华俊,等. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究[J]. 中国农业科学,2004,**37**(8):1166-1171.
- [22] 李德波,张纪伍,李维新,等. 不同农业措施对稻田 CH₄ 排放通量的影响[J]. 农村生态环境,1993,(增刊):13-27.
- [23] 陈德章,王明星. 稻田 CH₄ 排放和土壤、大气条件的关系[J]. 地球科学进展,1993,**8**(5):37-45.
- [24] Cai Z C, Xu H, Zhang H, *et al.* Estimate of methane emission from rice paddy fields in Taihu Lake region, China [J]. Pedosphere, 1994, **4**(4):297-336.
- [25] 蔡祖聪,颜晓元,徐华,等. 氮肥品种对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 土壤学报,1995,**32**: 136-143.
- [26] Cai Z C, Tsuruta H, Minami K. Methane emission from rice fields in China: measurements and influencing factors [J]. J Geophys Res, 2000, **105**(D13): 17231-17242.
- [27] 郑循华,王明星,王跃思,等. 华东稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. 大气科学,1999,**21**(2): 231-237.
- [28] 熊效振,沈壬兴,王明星,等. 太湖流域单季的 CH₄ 排放研究[J]. 大气科学,1999,**23**(1): 9-18.
- [29] 邹建文,黄耀,宗良纲,等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响[J]. 环境科学,2003,**24**(4): 7-21.
- [30] 陈书涛,黄耀,郑循华,等. 种植不同作物对农田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响及其驱动因子[J]. 气候与环境研究,2005,**12**(2): 147-155.
- [31] 康国定. 中国稻田甲烷排放时空变化特征研究[D]. 南京: 南京大学,2003. 52-64.
- [32] 王效科,欧阳志云,苗鸿. DNDC 模型在长江三角洲农田生态系统的 CH₄ 和 N₂O 排放量估算中的应用[J]. 环境科学, 2001,**22**(3): 15-19.
- [33] 蒋静艳,黄耀,宗良纲,等. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国环境科学,2003,**23**(5): 552-556.