

亚热带典型小流域水稻土土壤体积质量预测模型构建与评估

邹刚华^{1,2}, 李勇^{2*}, 李裕元², 彭佩钦¹

(1 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要:以亚热带地区湖南长沙县金井镇水稻土作为研究对象,采集了19个深1 m的原状土剖面并分层取样。选取土壤有机碳含量、质地和深度作为参数利用多元逐步回归法建立了该地区土壤体积质量回归模型,且与已有模型进行比较验证,结果表明:土壤体积质量受有机碳影响最大,相关系数为-0.81,其次为深度和质地,但受黏粒影响较小,水稻土质地主要以壤土和粉壤土为主。表层土壤(0~20 cm)体积质量为0.79~1.66 g/cm³,均值1.27 g/cm³;非表层土壤(20~100 cm)为1.32~1.80 g/cm³,均值1.58 g/cm³。本研究所建立的预测模型确定系数为0.75,模型ME和RMSE分别为0.01和0.10,同时发现Kaur和Manrique两模型预测效果也相对较好,但本研究建立的模型表现更为优越。该模型的建立对于估测亚热带稻田土壤碳储量及水文模型运用等方面亦有着重要的作用。

关键词:稻田;体积质量;回归模型;碳储量;水文模型

中图分类号:S152.5

体积质量(容重)作为反映土壤物理特性的重要性质,表征着土壤干基质与其所占容积的关系,在水文模型、估计土壤碳储量和养分库中得到广泛的应用^[1],同时还能用于计算震波速度^[2]和估测土壤水分特征曲线和饱和导水率等水文动力学性质^[3-4]。由于体积质量间接反映了土壤孔隙度和紧实度,从而影响到土壤中水分和溶质的迁移及其通透性和水分下渗能力,使得用以改善土壤功效的管理措施通过体积质量能够见到实效。体积质量受土壤质地和结构,压实状况以及有机质含量影响大,不同地区和不同层次的土壤体积质量呈现较大差异。在实际的模型应用中需要大量的体积质量数据,但直接测定土壤体积质量显得费力而且昂贵,尤其对深层土壤,因此期望找到一种能间接估算体积质量的经济且有效的途径,而传递函数法即是通过土壤简易性质间接预估某种性质的方法,该法已在估测土壤水文性质中得到充分应用^[5]。

当前已有不少国外学者对土壤体积质量进行了模型建立和预测研究,国内则普遍采用直接测定而非间接估测。相关模型中最常用的参数包括有机质或强热失量和质地^[6-7],有的还利用了pH、水分含量、阳离子交换量和土壤深度等^[8-9]。研究者们通过利用当

地实测数据验证现存模型发现,引用这些模型需谨慎^[10-11],不同地区需对既有模型进行校正才能运用。

本文选取亚热带地区典型小流域水稻土作为研究对象,通过测定其理化性质,利用逐步回归方法建立该地区土壤体积质量回归模型并与现有的模型进行比较评估以期建立合理的模型,从而为该流域甚至亚热带区域提供数据支持,并且为了解该地区或该种土地利用方式的碳储量及建立水分和溶质迁移模型等方面给予便利。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区湖南省长沙县金井镇小流域位于亚热带地区,总面积135 km²,经纬度为28°30′~28°38′N,113°18′~113°26′E。年均降水量1300~1400 mm,年均气温17.5℃,无霜期274天,年日照1663 h,相对湿度80%左右,属典型亚热带湿润季风气候。全区平均海拔高度61 m,相对高差一般在100 m以内,为典型的湘南丘岗地貌。区内土地利用方式主要包括林地、耕地、水域、园地等,分别占总土地面积的61.0%、17.0%、3.0%和2.7%,农田主要分布在

基金项目:中国科学院创新团队项目(KZCX2-YW-T07)和“百人计划”项目资助。

* 通讯作者(yli@isa.ac.cn)

作者简介:邹刚华(1985—),男,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向为土壤物理。E-mail: zou_ghua@163.com

沟道内和河流两岸冲积平原上。

1.2 样品采集与测定

对整个小流域的稻田土进行平均布点取样,包括上冲、中冲和下冲,利用原状土采集动力装置共采集了 19 个深 1 m 直径 90 mm 的原状土剖面,带回实验室于不同深度区间切割(在 0~30、40~50 和 70~80 cm 区间各按 5 cm 长度分层切割),并用 100 cm³ 环刀取样于 105 ℃ 烘干至恒重(>24 h)以计算土壤体积质量。各层次取完环刀所剩土样,自然风干,并拣出大石砾和残根,然后分别过 2 mm 筛和 0.25 mm 筛用于测定土壤机械组成和有机碳含量。机械组成采用比重计法测定,粒度分级为美国制即:砂粒(2~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm),有机碳利用碳氮分析仪测定,有机质则通过有机碳转换而来,转换系数为 1.724。

1.3 数据计算与统计

体积质量(bulk density, BD)计算公式:

$$\rho_b = m_s / v_t \quad (1)$$

式中, ρ_b 为土壤体积质量(g/cm³); m_s 为烘干土质量(g); v_t 为总体积(包括土壤孔隙和基质)(cm³)。

模型确定系数(R^2_{adj}):

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \left[\frac{n-1}{n-m-1} \right] \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSQ} \quad (3)$$

模型评估参数:均差(mean error, ME)和均方差(root mean square error, RMSE):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

式中, n 为样品数; m 为变量数; y_i 为观测值; \hat{y}_i 为

预测值; SSE 和 SSQ 分别为模型残差平方和以及总平方和。

数据利用 Excel 预先整理,然后运用 R 统计软件(2.13.0 版本)进行相关作图分析与统计检验。

2 分析与讨论

2.1 土壤理化性质

本研究分别比较了不同层次(表层:0~20 cm;非表层:20~100 cm)的土壤体积质量、有机碳、机械组成分布情况(表 1)。从表 1 中看出,表层体积质量范围为 0.79~1.66 g/cm³;而非表层为 1.32~1.80 g/cm³。表层体积质量平均值为 1.27 g/cm³,低于非表层 1.58 g/cm³,这主要是由于表层土受耕种扰动影响大,而非表层扰动小且被上层土壤压实而使得土壤紧凑,孔隙小而体积质量增大。表层体积质量变异相对非表层大,这主要是由于非表层土壤受干扰小所致。对于有机碳含量,两层都属于中等变异,变异系数分别为 33.52% 和 66.85%,有机碳含量最大值出现在表层为 27.20 g/kg,最小值出现在非表层为 1.70 g/kg,非表层土壤有机碳平均值仅为 5.57 g/kg。两层土壤性质中大部分都属于中等变异,且一般非表层变异系数相对较大(体积质量除外)。研究区域稻田土壤质地以壤土和粉壤土为主,分别约占 48% 和 32%。

对全部 168 个样品按耕作土壤发生层作箱图展示(图 1),体积质量和有机质随土壤深度的变化恰好相反,前者为增大趋势,后者为减小变化。体积质量在 20~30 cm 土层后减小缓慢,而有机碳含量则随土壤深度增大而急剧下降。颗粒组成中黏粒含量相对较低,且波动较小。

2.2 土壤体积质量模型建立

2.2.1 土壤体积质量与理化性质间相关性 建立模型前必须了解参数间的相互关联,利用 R 统计软件得到土壤不同性质间关系矩阵图(图 2),其中对角线部分为参数名称,下三角部分为相关系数,上三角

表 1 稻田土壤不同层次理化性质特征
Table 1 Soil properties in various layers of paddy fields

性质	0~20 cm (n=64)					20~100 cm (n=104)				
	最大值	最小值	均值	标准差	CV(%)	最大值	最小值	均值	标准差	CV(%)
体积质量 (g/cm ³)	1.66	0.79	1.27	0.21	16.24	1.80	1.32	1.58	0.11	6.71
有机碳 (g/kg)	27.20	5.10	15.52	5.20	33.52	19.50	1.70	5.57	3.72	66.85
砂粒 (g/kg)	560	76	324.4	138.7	42.76	673	79	310.4	152.8	49.21
粉粒 (g/kg)	673	287	447.6	129.3	28.89	718	218	462.9	141.2	30.51
黏粒 (g/kg)	340	153	228	37.5	16.47	355	109	226.7	46.2	20.37

注: CV 为变异系数(=标准差/均值 × 100), CV 10%:弱变异; 10%<CV 100%:中等变异; CV>100%:强变异。

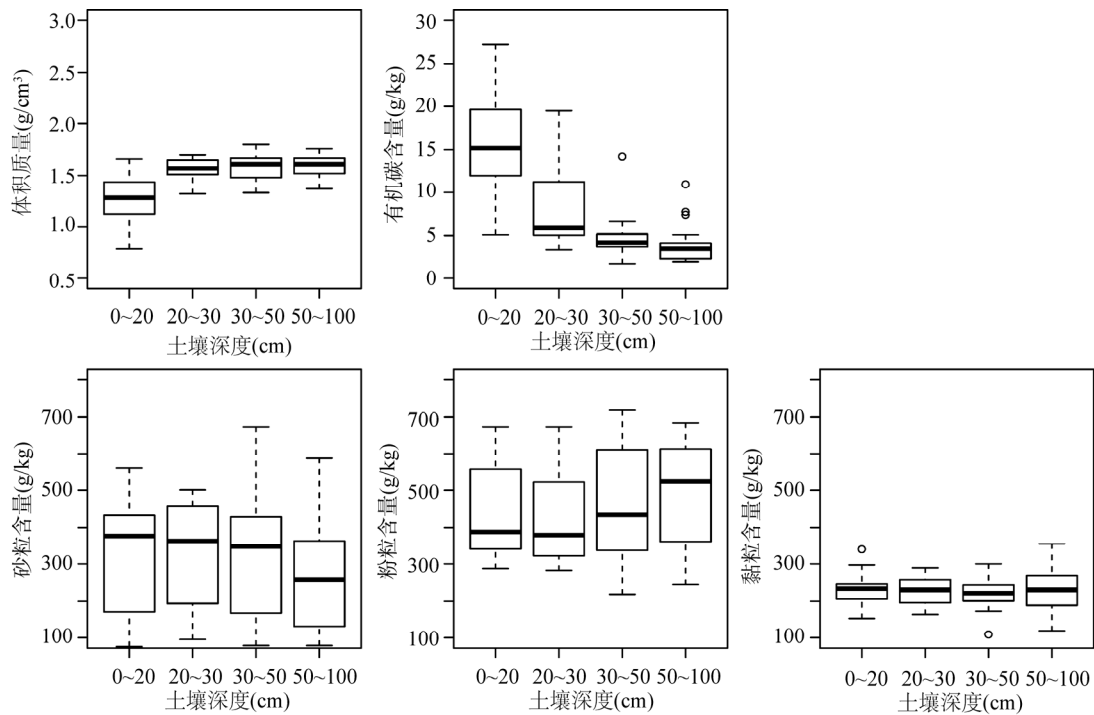


图 1 土壤理化性质随土壤深度的变化
Fig. 1 Changes of soil properties in different depths

部分为散点图显示。图中很清楚地表明体积质量与土壤深度关系密切,为正相关,说明体积质量随深度增加而变大。体积质量与砂粒和粉粒关系显著,并且砂粒和粉粒之间关系非常紧密,但体积质量与黏粒关系很差,相关系数仅为-0.07。所有土壤基本性质中有机碳与体积质量关系最好,相关系数达到-0.81,为负相关。而有机碳也随土壤深度变化明显,以上分析特征表明体积质量完全可以由其他参数来间接表示。

2.2.2 模型建立 通过分析参数间相关性后,可以了解到稻田土壤体积质量主要受有机碳和深度影响,然后再对有机碳进行变换以期找到更合理的参数形式,对有机碳含量分别取原形、平方形式和平方根形式采用多元逐步回归方法并选取不同参数利用所有的 168 个独立样本建立模型(表 2)。比较发现,有机碳取原形相对较好,模型确定系数较高。模型中仅仅利用有机碳含量就能反映体积质量 65% 的变异性,加入质地和深度参数后,确定系数有所提高,达到了 0.75,若不用质地而仅用有机碳和深度,确定系数则有所下降。

通过上述比较分析后,利用有机碳、质地和深度作为参数建立了水稻土土壤体积质量回归模型,其模型如公式(7)($n = 168, P < 0.001$),而若仅利用有机碳和质地,不考虑深度因素建立的模型见公式(6),其模型确定系数为 0.71,稍低于考虑土壤深度而建立的模

型。

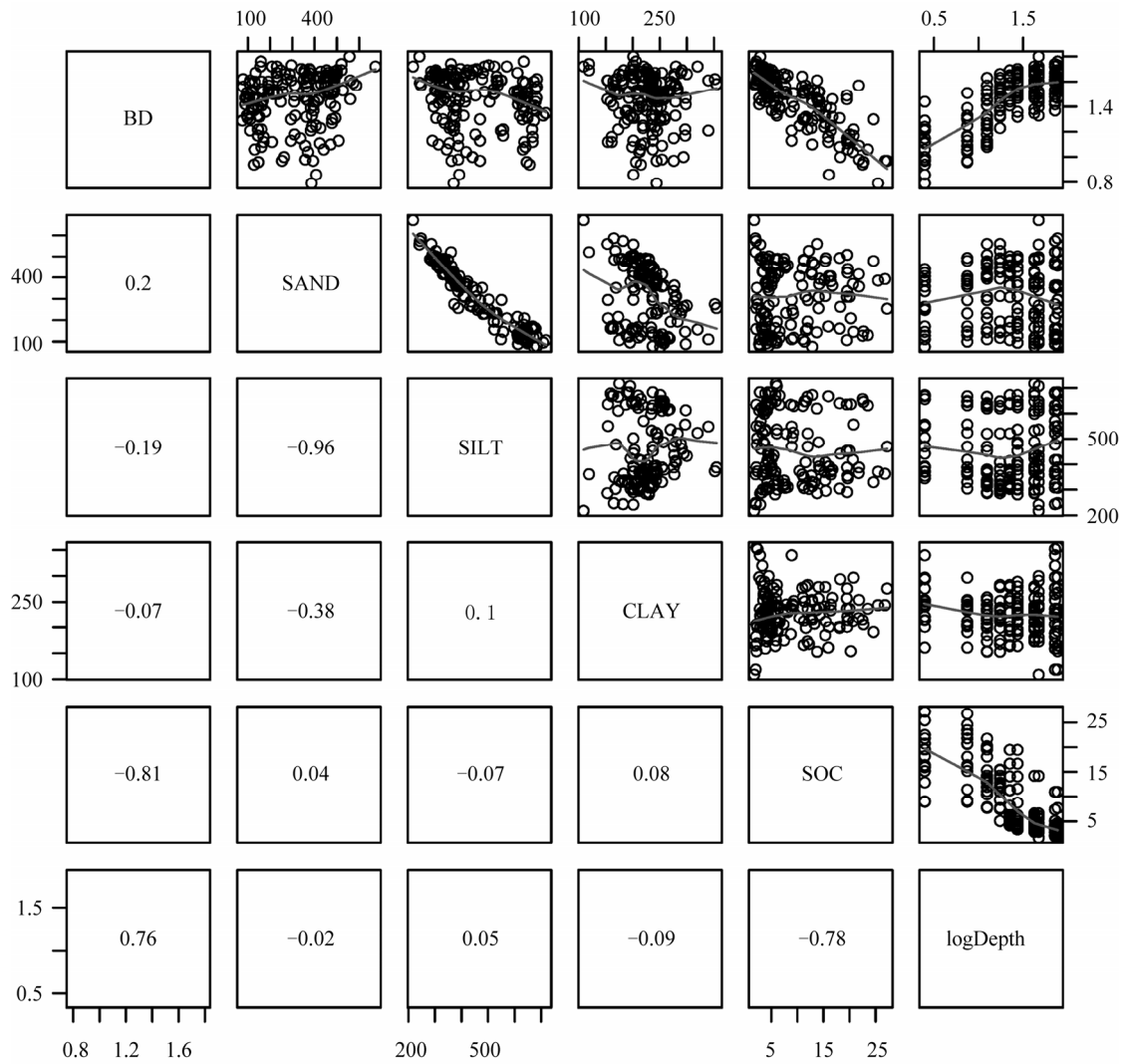
$$BD = 1.888 - 0.0004 \times \text{SILT} - 0.027 \times \text{SOC} \quad (6)$$

$$BD = 1.588 - 0.0004 \times \text{SILT} - 0.018 \times \text{SOC} + 0.162 \times \log(\text{Depth}) \quad (7)$$

2.3 模型验证评估

2.3.1 模型选取 目前已有不少学者利用各地实测数据建立了土壤体积质量预测模型,且主要用到的参数为有机碳或有机质和质地,研究者们为了获得统一模型,对现有模型比较分析后发现各个模型的适用范围有限^[10],无法统一,因而各地在适用模型时必须对其校正后才能使用,否则会有偏差,有些还很大。本文选取了 5 个有代表性的模型来进行比较验证(表 3),这些模型建立的时间、区域以及所用的数据量都不一样,因而使其比较分析更具合理性。

2.3.2 模型验证 分别用上述模型和本文所建立模型对所有稻田样本数据进行预测并作成 1:1 图。如图 3 显示,Adams、Federer 和 Kaur 模型预测值基本上都偏小,而 Manrique 和 Bernoux 两模型得到的预测值则有大有小,但两模型体积质量预测值都在 1.0 g/cm³ 以上。Adam 模型的预测值都位于 0.5 ~ 1.0 g/cm³ 之间,Kaur 模型预测值范围较宽。从图中可以看出无论从预测范围上,还是模型观测值和预测值间相关性上,本试验所建立的模型都有较大优势。



(BD 表示土壤体积质量, 单位 g/cm^3 ; logDepth 表示土壤深度(单位 cm)取 10 为底的对数; CLAY、SILT 和 SAND 分别为黏粒、粉粒、砂粒含量, 单位 g/kg)

图 2 土壤理化性质相关性

Fig. 2 Relation between soil properties

表 2 应用不同参数建模估算土壤体积质量的确定系数(R^2)比较($n = 168$)

Table 2 Determined coefficients of bulk density models developed with different parameters

参数	R^2	参数	R^2	参数	R^2
SOC	0.65	SOC ²	0.62	SOC ^{0.5}	0.63
SOC+T	0.71	SOC ² +T	0.68	SOC ^{0.5} +T	0.69
SOC+T+log(Depth)	0.75	SOC ² +T+ log(Depth)	0.75	SOC ^{0.5} +T+ log(Depth)	0.73
SOC+log(Depth)	0.69	SOC ² + log(Depth)	0.69	SOC ^{0.5} + log(Depth)	0.67

注：SOC 为土壤有机碳；T 为土壤质地。

表 3 选取的土壤体积质量预测模型

Table 3 Selected models of bulk density for comparison

模型	方程	R^2	n	国家
Adams (1973) ^[12]	$BD = 100/((SOM/0.224) + (100 - SOM/1.27))$	nd	45	英国
Federer (1983) ^[13]	$BD = \text{EXP}(-2.31 - 1.079\ln SOM - 0.113(\ln SOM)^2)$	nd	nd	美国
Manrique (1991) ^[14]	$BD = 1.660 - 0.318\text{SOC}^{0.5}$	0.41	19 651	美国
Bernoux (1998) ^[15]	$BD = 1.398 - 0.0047\text{CLAY} - 0.042\text{SOC}$	0.50	323	巴西
Kaur (2002) ^[10]	$BD = \text{EXP}(0.313 - 0.191\text{SOC} + 0.02102\text{CLAY} - 0.000476(\text{CLAY})^2 - 0.00432\text{SILT})$	0.62	224	印度

注：nd 为没有数据；SOM 为土壤有机质，Adams 模型中其单位为 $\text{g}/100\text{g}$ ，而 Federer 模型中其单位为 g/g ；CLAY 和 SILT 单位都为 $\text{g}/100\text{g}$ 。

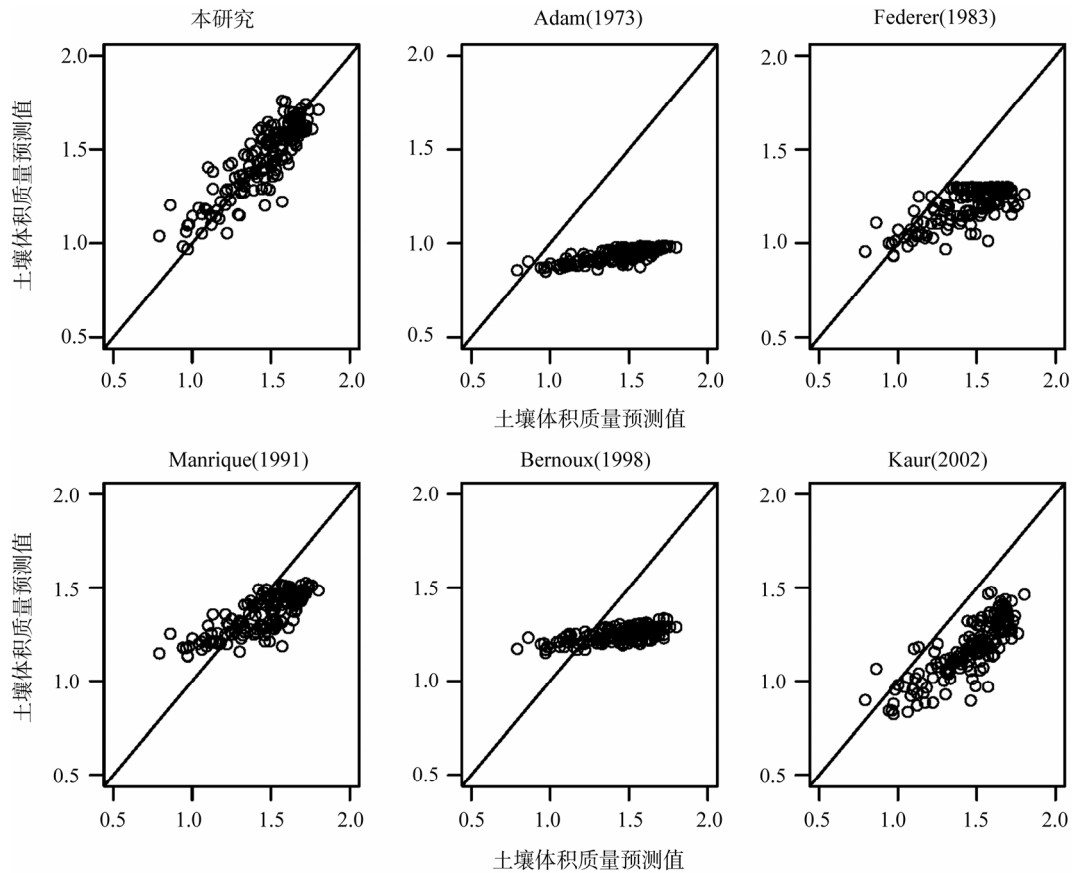


图 3 不同模型下体积质量实测值和预测值比较(1 : 1)

Fig. 3 Comparison between predicted and observed values of soil bulk density of each model (1 : 1)

再计算各模型预测时的平均偏差和均方差(表 4), Manrique 模型 ME 和 RMSE 值都很低, 分别为 0.09 和 0.17, 其次为 Bernoux、Federer 和 Kaur 模型, 而本文所建模型的 ME 和 RMSE 值则最低, 分别为 0.01 和 0.10, 表明预测效果最好。比较预测值和实测值间的相关性时 Kaur 和 Manrique 两模型较好, 预测值分别能解释 67% 和 63% 实测体积质量, 但还是低于本文 $R^2=0.75$ 的相关性。以上分析可以得出, 除了本文所建立模型外, Kaur 和 Manrique 两模型也较好。但经过校正后, 预测效果会更好。Kaur 等人^[10]利用印度土样数据比较了 12 个模型后也发现 Manrique 模

表 4 不同土壤体积质量模型预测结果的相关统计值比较
Table 4 Statistics analysis of different soil bulk density models for prediction

模型	ME	RMSE	R^2
Adams (1973)	0.52	0.55	0.65
Federer (1983)	0.25	0.29	0.55
Manrique (1991)	0.09	0.17	0.63
Bernoux (1998)	0.21	0.28	0.44
Kaur (2002)	0.28	0.30	0.67
本研究(2011)	0.01	0.10	0.75

型预测较好, 而 Adams 模型无论 ME 或 RMSE 值都不理想, 这与本文结论较一致, 而且 Kaur 等人^[10]认为自己建立的模型偏差更小, 但在利用本研究中数据时却没有 Manrique 模型预测效果好, 这充分表明模型运用具有很强的地域性。

3 结论

(1) 体积质量受有机碳影响最明显, 相关系数达 -0.81 。表层(0 ~ 20 cm)土壤平均体积质量为 1.27 g/cm^3 , 而非表层(20 ~ 100 cm)则为 1.58 g/cm^3 。水稻田土壤体积质量受黏粒含量影响非常小, 质地主要以壤土和粉壤土为主, 而其中粉粒和砂粒间关系紧密, 相关系数达到 -0.96 。

(2) 土壤有机碳含量表层变化范围为 $5.10 \sim 27.20 \text{ g/kg}$, 平均值为 15.50 g/kg 。而非表层有机碳平均值为 5.57 g/kg 。有机碳属于中等变异参数。

(3) 利用多元逐步回归方法建立了南方亚热带区典型小流域水稻土土壤体积质量回归模型, 模型确定系数 R^2 为 0.75, 并通过与其他已有体积质量模型比较验证后得知 Kaur 和 Manrique 两模型在估测时也较好, 前者预测值会偏小些, 而后者相关性差一点,

但应用当地数据构建的本地模型表现更为优越,预测更加精确。

参考文献：

- [1] Song GH, Li LQ, Pan GX, Zhang Q. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74: 47-62
- [2] Gardner GHF, Gardner LW, Gregory AR. Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps[J]. *Geophysics*, 1974, 39: 770-780
- [3] Huang MB, Fredlund DG, Fredlund MD. Comparison of measured and PTF predictions of SWCCs for loess soils in China[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(2): 105-117
- [4] Givi J, Prasher SO, Patel RM. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting points[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 70: 83-96
- [5] Pachepskaya YA, Rawls WJ, Lin HS. Hydropedology and pedotransfer functions[J]. *Geoderma*, 2006, 131: 308-316.
- [6] Suuster E, Ritz C, Roostalu H, Reintam E, Kolli R, Astover A. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils[J]. *Geoderma*, 2011, 163: 74-82
- [7] Harrison AF, Bocock KL. Estimation of soil bulk-density from loss-on-ignition values[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1981, 8: 919-927
- [8] Benites VM, Machado PLOA, Fidalgo ECC, Coelho MR, Madari BE. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil[J]. *Geoderma*, 2007, 139: 90-97
- [9] Hernanz JL, Peixoto H, Cerisola C, Sánchez-Girón V. An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth[J]. *Journal of Terramechanics*, 2000, 37: 167-184
- [10] Kaur R, Kumar S, Gurung HP. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40: 847-857
- [11] De Vos B, Van Meirvenne M, Quataert P, Deckers J, Muys B. Predictive Quality of Pedotransfer Functions for Estimating bulk density for forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69: 500-510
- [12] Adams WA. The effect of organic matter on the bulk density and true densities of some uncultivated podzolic soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1973, 24(1): 10-17
- [13] Federer CA. Nitrogen mineralization and nitrification: depth variation in four New England forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(5): 1 008-1 014
- [14] Manrique LA, Jones CA. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(2): 476-481
- [15] Bernoux M, Cerri C, Arrouays D, Jolivet C, Volkoff B. Bulk densities of brazilian amazon soils related to other soil properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(3): 743-749

Estimation of Soil Bulk Density for Paddy Soils in a Typical Catchment in Southern Subtropical China

ZOU Gang-hua^{1,2}, LI Yong^{2*}, LI Yu-yuan², PENG Pei-qin¹

(1 *Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China*; 2 *Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China*)

Abstract: Soil bulk density is vital for national carbon inventory and hydrological modeling study. In this study 19 intact paddy soil cores at a depth of 0–1 m located in Jinjing Town of Hunan Province in subtropical region were collected. By utilizing soil organic carbon content, texture and soil depth as prediction parameters, a regressive model for estimating soil bulk density was developed and compared to existing models. Results indicated that: i) soil bulk density is significantly influenced by soil organic carbon content with $r = -0.81$, followed by soil depth and texture, but influenced less by soil clay content. Loam and silt loamy were accounted for most of studied soil textures. The bulk density ranged from 0.79 to 1.66 g/cm³ with an average of 1.27 g/cm³ for topsoil, but varied between 1.32 and 1.80 g/cm³ with an average of 1.58 g/cm³ for subsoil, and ii) the adjusted determined coefficient of derived model was 0.75 with 0.01 of ME and 0.10 of RMSE, respectively. This study also found that the Kaur (2002) and Manrique (1991) models could make good predictions of soil bulk density, but still not as good as the model developed in this study. Thus, the soil bulk density prediction model developed in this study will play a crucial role in estimating carbon stock of paddy fields as well as in applying hydrological models in the region.

Key words: Paddy soil, Bulk density, Regressive model, Carbon inventory, Hydrological model