



田耀武, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪流域森林土壤有机碳、有机质与容重间的回归模型[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(1): 89-95.

三峡库区兰陵溪流域森林土壤有机碳、 有机质与容重间的回归模型

田耀武^{1,2}, 黄志霖², 肖文发², 王宁¹, 刘晶¹

(1 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003;

2 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所/国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要:【目的】建立三峡库区兰陵溪流域森林土壤有机碳、有机质与容重之间的回归模型,完善土壤属性数据库。【方法】利用该流域森林土壤调查数据库,确立土壤有机质(SOM)与有机碳(SOC)间的转换系数,构建土壤容重(BD)与 SOM(SOC)含量之间的回归模型,并使用决定系数(R^2)、Nash-Sutcliffe 效率系数(E)、百分误差(P_e)等统计参量进行检验。【结果】Van Bemmelen 转换系数(0.58)不适合该研究区($R^2 = 0.62, E = 0.51, P_e = -31.16\%$), SOC-SOD 转换系数应该为 0.455($R^2 = 0.85, E = 0.86, P_e = -3.0\%$),不同深度 SOC-SOD 转换系数并不相同,随土壤深度的增加迅速降低;其他地区构建的 BD-SOM(SOC)回归模型不能直接应用于该区域,BD-SOM 模型参数优化后可应用于该区域;BD-SOC 模型参数优化后,对数多项式模型可以用于该区域。【结论】BD-SOM 回归模型模拟值优于 BD-SOC 模型,建议使用 BD-SOM 回归模型进行土壤数据库完善。其中效率最高、误差最小的模型为 Federer 有机密度模型($R^2 = 0.75, E = 0.81, P_e = 5.4\%$),可以在该地区推广应用。

关键词:三峡库区; 森林土壤; 有机碳; 有机质; 容重; 回归模型

中图分类号:X833; S714

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2016)01-0089-07

Organic carbon, organic matter and bulk density regression models for forest soils in Lanlingxi watershed, Three Gorges Reservoir area

TIAN Yaowu^{1,2}, HUANG Zhilin², XIAO Wenfa², WANG Ning¹, LIU Jing¹

(1 College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment State Forestry Administration/Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract:【Objective】To establish regression models of soil organic carbon, organic matter and bulk density for forest soils and improve the regional soil attribute database in Lanlingxi watershed, Three Gorges Reservoir area.【Method】Using forest soil survey data of this watershed, the conversion factor for soil organic matter (SOM) to soil organic carbon (SOC) was established, and the regression models linking soil bulk density (BD) and SOM (SOC) content were built. The whole evaluation consisted of determining the coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (E), and the percentage error (P_e).【Result】The Van Bemmelen conversion coefficient (0.58) could not be directly applied in this watershed. The proper SOC-SOM conversion coefficient was 0.455, as SOC-SOD conversion

收稿日期:2015-04-14 优先出版时间:2015-12-07

优先出版网址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20151207.1133.032.html>

作者简介:田耀武(1975—),男,副教授,博士, E-mail: tianyaowu@126.com; 通信作者:黄志霖(1966—),男,副研究员,博士, E-mail: huangzhl@163.com

基金项目:国家自然科学基金(U1404322);科技基础性工作专项(2014FY120700)

coefficients varied from different depth of soil, declining quickly with the increase of depth. The BD-SOM (SOC) regression models built in other regions could not be directly applied to this region. When parameters of the BD-SOM models were optimized, the logarithm polynomial model could be used for this region. 【Conclusion】Overall, the simulated values of BD-SOM regression models are better than those of BD-SOC models, and it is recommended to use BD-SOM regression models to improve the soil database. Among the optimized BD-SOM models, the recommended model for this study is Federer organic density model with the highest efficiency ($E = 0.81$) and the lowest error ($P_e = 5.4\%$).

Key words: Three Gorges Reservoir area; forest soil; organic carbon; organic matter; bulk density; regression model

土壤有机质(SOM)或有机碳(SOC)是土壤质量评估的重要指标之一,其储量或密度动态是生态系统对环境变化的响应,直接影响全球碳循环^[1-2]。SOM(SOC)含量及动态研究时,常采用Van Bemmelen转换系数 [$w(\text{SOC})/w(\text{SOM}) = 0.580$ 或 $w(\text{SOM})/w(\text{SOC}) = 1.724$] 进行换算^[1]。但Van Bemmelen系数受土壤类型、土壤深度、植被类型和土壤容重(BD)等环境因素的影响,并不适用于所有土壤^[1, 3]。BD是土壤结构属性之一,是SOC和SOM基于体积、面积数据转换到土壤质量数据的基础参数^[1]。SOM(SOC)含量的变化改变了土壤的可压缩性,是BD最主要的影响因素。理论上测定BD简单直接,但实际测定BD工作量巨大且又耗时。一般认为,BD随SOM(SOC)含量增加而减小^[1, 4],BD-SOM(SOC)回归关系普遍存在。用其回归关系完善土壤数据库是一简单有效的方法^[1, 4-5]。

BD-SOM(SOC)回归模型有线性、多项式、幂/指数等形式^[1, 3]。Adams^[6]基于纯矿质土壤容重,提出了BD-SOM经验模型,Federer等^[4]基于有机密度(每单位体积土壤的有机物质)概念,提出了BD-SOM有机密度模型。Adams经验模型是把有机密度作为定值,实质仍为有机密度类型。上述模型得到了其他学者的应用和验证^[1, 3]。但鲜有文献进行SOC-SOM转化系数、BD-SOM(SOC)回归模型的综合研究。我们的研究目的是:确定三峡库区兰陵溪流域SOC与SOM间的转换系数,评定文献中BD-SOM(SOC)模型在本地区的适用性,建立本地区BD-SOM(SOC)回归模型,以期为完善该流域土壤属性数据库提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区兰陵溪流域位于湖北省秭归县中东部
<http://xuebao.scau.edu.cn>

($110^{\circ}56' \text{E}, 30^{\circ}50' \text{N}$),长江三峡大坝上游5 km处,典型的农林复合小流域,面积 1100 hm^2 ,属亚热带大陆性季风气候,年均气温 18.0°C ,年均日照1 624.8 h,年均相对湿度77%,年均降水量1 150 mm,无霜期307 d。土壤以黄壤和山地黄棕壤为主。由于长期过度开发,自然植被破坏严重,林地为马尾松 *Pinus massoniana* 次生林和松、栎 *Quercus* 混交林。灌木林以黄荆 *Vitex negundo*、莢蒾 *Viburnum dilatatum*、毛黄栌 *Cotinus coggygria*、杜鹃 *Rhododendron simsii*、胡枝子 *Lespedeza bicolor* 和马桑 *Coriaria sinica* 等为主。

1.2 土壤取样与分析

2013年8月,在三峡库区兰陵溪流域林地内机械布设125个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 样方,调查各样方立地条件及乔木、灌木、草本植物生长指标。在每个样方的一条对角线上,按等距法设3个样点,各点用直径5 cm土钻分层取样,每层20 cm,取样深至母质层。3样点同层土样充分混合,获得各样方分层土样。自然风干混合土样,除去草根、大石砾等杂质,过2 mm钢筛,磨细。各样方取样后,在样方中心处挖简单土壤剖面,用修土刀修平,在0~20、20~40、40~60 cm层中,用 100 cm^3 环刀取样、加盖、称质量,精确至0.01 g。 105°C 烘至恒质量,计算土壤含水率和土壤容重。

干烧法测定SOM含量。 10 g 左右风干的土壤样品放入 30 mL 的坩埚。 105°C 烘箱干燥2 h,在干燥器中冷却,称质量,然后将样品在 $(550 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 马弗炉中过夜、灰化。将样品在干燥器中冷却并称质量。烘干质量(105°C 恒质量)和灰化质量之间的质量差即为SOM净质量。SOC含量测定采用重铬酸钾-外加热法^[7]。

1.3 SOC与SOM量值的转换

$$w(\text{SOC}) = 0.58w(\text{SOM}) \text{ 或}$$

$$w(\text{SOM}) = 1.724w(\text{SOC}), \quad (1)$$

$$w(\text{SOC}) = aw(\text{SOM}), \quad (2)$$

$$w(\text{SOC}) = a_{\text{深度}} w(\text{SOM}), \quad (3)$$

式中, $w(\text{SOC})$ 为有机碳质量分数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $w(\text{SOM})$ 为有机质质量分数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 0.58、1.724 为 Van Bemmelen 转换系数, a 为本流域转换系数, $a_{\text{深度}}$ 表示不同土壤深度内的转换系数。

采用上述森林土壤属性数据库对式(2)、式(3)进行参数估计。通过式(4)~式(6), 使用 Nash-Sut-

cliffe 预测效率系数 E ^[8]、误差百分比 P_e 、决定系数 R^2 等 3 个统计参量评定 Van Bemmelen 转换系数和 a 值的转换精度。

1.4 文献中回归模型的检验

BD-SOM(SOC) 回归模型有线性模型、多项式模型、幂指数模型和有机密度模型等(表 1)。利用研究区 SOM(SOC) 数据和文献报道的模型, 进行 BD 值的模拟, 并使用式(4)~式(6) 中 E 、 P_e 、 R^2 等 3 个统计参量进行精度评定。

表 1 文献中常见的 BD-SOM 回归模型¹⁾

Tab. 1 Types of BD-SOM regression models in the literatures

类型	模型 ¹⁾	文献来源
线性	$\rho_s = a + bw(\text{SOM})$	[9]
多项式	$\rho_s = a + bw(\text{SOM}) + cw^2(\text{SOM})$	[3]
对数多项式	$\ln\rho_s = a + b \ln w(\text{SOM}) + c \ln^2 w(\text{SOM})$	[4]
	$\rho_s = a + bw(\text{SOM}) + c \ln w(\text{SOM}) + d \ln^2 w(\text{SOM})$	[3]
幂/指数	$\rho_s = ae^{-bw(\text{SOM})}$	[3]
	$\rho_s = 1.66 - 0.318w^{0.5}(\text{SOM})$	[10]
有机密度	$\rho_s = \rho_{\text{bm}}\rho_{\text{bo}} / [\rho_{\text{bm}}w(\text{SOM}) + (1 - w(\text{SOM}))\rho_{\text{bo}}]$	[4,11]
	$\rho_s = 100 / [w(\text{SOM})/0.244 + (100 - w(\text{SOM}))/\rho_{\text{bm}}]$	[6,12]

1) ρ_s 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), ρ_{bm} 为纯矿质土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), ρ_{bo} 为纯有机质容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), a 、 b 、 c 、 d 为系数, $w(\text{SOM})$ 为有机质质量分数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.5 模型参数的确定

利用研究区土壤数据库, 使用 Microsoft Excel 2013 中 Solver Add-In 模块进行 BD-SOM(SOC) 模型的规划求解, 确定表 1 中模型参数。所有数据在对数转换前进行方差同质性分析, 检验数据的正态分布性。

1.6 模型精度的评定

通过式(4)~式(6), 使用 Nash-Sutcliffe 预测效率系数 E ^[8]、误差百分比 P_e 、决定系数 R^2 等 3 个统计参量评定模型模拟能力:

$$E = 1.0 - \sum_{i=1}^N (M_i - P_i)^2 / \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2, \quad (4)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^N (M_i - P_i) / \sum_{i=1}^N M_i, \quad (5)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2, \quad (6)$$

式中, N 为样点总数, M_i 为第 i 个观测值, \bar{M} 为平均观测值, P_i 为模拟值, \bar{P} 为平均模拟值。

E 的统计意义为观测值与模拟值回归线与 1:1 线的符合程度^[13], E 为负值或较小时其统计意义表示不能被接受, $E > 0.6$ 表示模拟结果可以接受^[14],

$E = 1$ 时表示观测值与模拟值完全相等; P_e 表示模拟值对观测值误差百分比, Chiew 等^[14]认为 $P_e < 15\%$ 时模型模拟误差可以接受; 决定系数 R^2 统计意义为观测值与模拟值之间可以相互以直线关系说明部分所占的比率。

综合考虑 E 、 P_e 、 R^2 , 确立研究区最合适的 BD-SOM(SOC) 回归模型。

2 结果与分析

2.1 SOC-SOM 转换系数

从图 1 可以看出, $w(\text{SOC})$ 与 $w(\text{SOM})$ 高度相关 ($R^2 = 0.85$, $P < 0.001$), 数据点多低于 $y = 0.58$ x 线, 而高于 $y = 0.40$ x 线, 0.58 的转换系数将低估 $w(\text{SOC})$, 0.40 的转换系数将高估 $w(\text{SOC})$ 。SOC-SOM 最优回归方程可用式(7)表示:

$$w(\text{SOC}) = 0.455w(\text{SOM}). \quad (7)$$

采用 0.58 的 Van Bemmelen 系数时, $w(\text{SOC})$ 将偏低估计 31.1% (表 2), 超过了 $\pm 15\%$ 的误差限。 E 为 0.51, 也低于临界值 0.6。Van Bemmelen 系数不能用来进行 SOC-SOM 转换; 当转换系数取 0.455 时, 误差百分比仅为 -3.0% , E 为 0.86, 高于 0.6, 可以进行 SOC-SOM 转换。

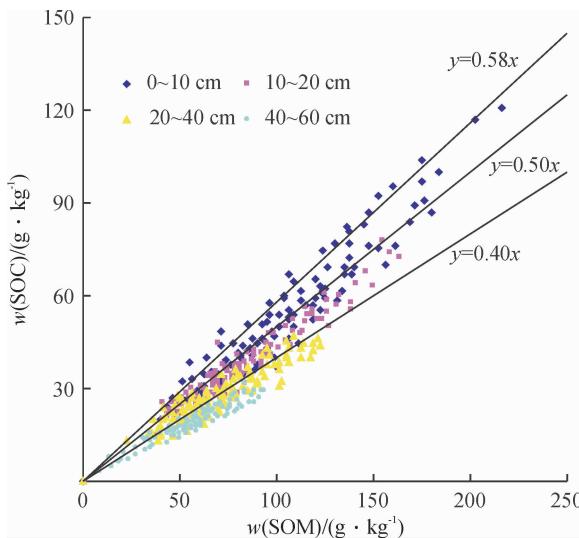


图1 三峡库区兰陵溪流域 SOM 与 SOC 含量散点图

Fig.1 Scatter plots of SOM and SOC contents for Lanlingxi watershed in Three Gorges Reservoir area

不同土壤深度的转换系数呈现规律性的层次分布,随着土壤深度的增加,转换系数 $a_{\text{深度}}$ 迅速降低。表2显示SOC-SOM 转换系数由 0 ~ 10 cm 层的 0.524 4 降低为 40 ~ 60 cm 层的 0.329 8。与不考虑土壤分层的 $w(\text{SOC}) = 0.455w(\text{SOM})$ 相比,0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 等层转换系数 $a_{\text{深度}}$ 的 R^2 和 E 增加, P_e 降低,均低于 -3.0% 。

2.2 BD-SOM 的回归关系

以相关文献报道的BD-SOM 回归模型推算土壤容重的评定结果列于表3。其中3个模型低估了BD, P_e 在 $-9.8\% \sim -17.4\%$, 其余6个则高估了BD, P_e 在 $9.6\% \sim 25.5\%$;有5个误差在 $\pm 15\%$ 范围之外,4个在 $\pm 15\%$ 范围之内。模拟效率上,9个模型的 E 均低于 0.6,这些模型均不能直接用来进行三峡库区BD-SOM 关系研究。

表2 三峡库区 SOC 与 SOM 之间的回归关系

Tab.2 Regression relationship between SOC and SOM in Three Gorges Reservoir area

土壤剖面层/cm	转换系数 $w(\text{SOC})/w(\text{SOM})$	$w_{\text{预测}}(\text{SOC})/(g \cdot kg^{-1})$	R^2	E	$P_e/\%$
0 ~ 60	0.580 0	18.77	0.62	0.51	-31.10
0 ~ 60	0.455 0	14.73	0.85	0.86	-3.00
0 ~ 10	0.524 4	22.39	0.89	0.89	1.60
10 ~ 20	0.454 1	15.20	0.94	0.95	0.00
20 ~ 40	0.395 1	11.39	0.86	0.84	-0.10
40 ~ 60	0.329 8	7.65	0.91	0.93	-0.13

表3 相关文献报道的BD-SOM 模型在本研究区的应用评定

Tab.3 Assessment of previously reported BD-SOM models for application in this study area

类型	模型 ¹⁾	R^2	E	$P_e/\%$	文献来源
对数多项式	$\ln \rho_s = -2.39 - 1.316 \ln w(\text{SOM}) - 0.167 \ln^2 w(\text{SOM})$	0.35	0.38	25.5	[15]
	$\ln \rho_s = -1.81 - 0.892 \ln w(\text{SOM}) - 0.092 \ln^2 w(\text{SOM})$	0.36	0.40	-17.4	[16]
	$\rho_s = -1.977 - 4.105w(\text{SOM}) - 1.229 \ln w(\text{SOM}) - 0.103 \ln^2 w(\text{SOM})$	0.55	0.45	12.6	[3]
有机密度	$\rho_s = 0.111 \times 1.767 / [1.767w(\text{SOM}) + 0.11(1 - w(\text{SOM}))]$	0.48	0.32	-9.8	[3]
	$\rho_s = 0.120 \times 1.400 / [1.400w(\text{SOM}) + 0.120(1 - w(\text{SOM}))]$	0.42	0.36	-16.9	[11]
	$\rho_s = 1.111 \times 1.450 / [1.450w(\text{SOM}) + 1.11(1 - w(\text{SOM}))]$	0.65	0.56	19.6	[4]
	$\rho_s = 0.159 \times 1.561 / [1.561w(\text{SOM}) + 0.159(1 - w(\text{SOM}))]$	0.42	0.51	9.6	[16]
	$\rho_s = 100 / [w(\text{SOM})/0.244 + (100 - w(\text{SOM}))/1.64]$	0.51	0.45	16.4	[5]
	$\rho_s = 100 / [w(\text{SOM})/0.244 + (100 - w(\text{SOM}))/1.33]$	0.52	0.46	10.3	[12]

1) ρ_s 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)。

利用研究流域土壤数据对表1中的8个模型优化求解,结果列于表4。 R^2 和 E 较小、误差较大的模型为线性模型与幂函数模型。 R^2 、 E 、 P_e 最优的模型为Federer 有机密度模型和多项式模型。Federer 有机密度模型的 R^2 为 0.750 1, E 为 0.81, P_e 为 -5.4% , 对数多项式模型的 R^2 为 0.75, E 为 0.80, P_e 为 -6.6% 。表4中各模型模拟偏差 $P_e < 15\%$,效

率系数 $E > 0.6$,精度水平达到要求,均可用于BD-SOM 研究。

2.3 BD-SOC 的回归关系

表5为相关文献中10个BD-SOC 模型在本地区应用评定结果。10个模型的 P_e 均位于 $\pm 15\%$ 限值之外, E 均低于 0.6,有5个模型的 E 甚至为负值。表5中模型不能直接应用于三峡库区兰陵溪流域。

表4 三峡库区 SOM 与 BD 之间的回归关系

Tab. 4 Regression relationships between SOM and BD in Three Gorges Reservoir area

类型	模型 ¹⁾	R^2	E	$P_e/\%$
线性	$\rho_s = 1.2538 - 3.8668w(\text{SOM})$	0.59	0.69	14.0
多项式	$\rho_s = 1.3675 - 7.3835w(\text{SOM}) + 16.8000w^2(\text{SOM})$	0.76	0.75	0.0
对数多项式	$\ln(\rho_s) = -0.3368 + 0.4741 \ln w(\text{SOM}) - 0.0970 \ln^2 w(\text{SOM})$	0.79	0.75	9.5
	$\rho_s = -1.4781 + 2.4389w(\text{SOM}) - 2.7143 \ln w(\text{SOM}) - 0.6739 \ln^2 w(\text{SOM})$	0.75	0.80	6.6
指数	$\rho_s = 1.3026e^{-4.3780w(\text{SOM})}$	0.77	0.76	-12.3
幂函数	$\rho_s = 1.7100 - 0.4480w^{0.5}(\text{SOM})$	0.64	0.68	14.1
有机密度	$\rho_s = 0.1540 \times 1.4661 / [1.4661w(\text{SOM}) + 0.1540(1 - w(\text{SOM}))]$	0.75	0.81	-5.4
	$\rho_s = 100 / [w(\text{SOM}) / 0.2440 + (100 - w(\text{SOM})) / 1.4661]$	0.55	0.72	7.6

1) ρ_s 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

表5 相关文献报道的 BD-SOC 模型在本研究区的应用评定

Tab. 5 Assessment of previously reported BD-SOC models for application in this study area

类型	模型 ¹⁾	R^2	E	$P_e/\%$	文献来源
线性	$\rho_s = 1.3240 - 0.0088w(\text{SOC})$	0.14	-1.43	23.73	[17]
	$\rho_s = 1.5531 - 0.0167w(\text{SOC})$	0.14	-1.28	34.49	[18]
	$\rho_s = 1.4692 - 0.0056w(\text{SOC})$	0.00	-2.45	-21.13	[19]
	$\rho_s = 1.8974 - 0.0879w(\text{SOC})$	0.11	0.00	23.45	[20]
	$\rho_s = 0.8660 + 0.0147w(\text{SOC})$	0.00	-1.29	43.56	[21]
	$\rho_s = 1.2990 - 0.0115w(\text{SOC})$	0.00	-1.34	29.57	[22]
指数	$\rho_s = (2.6840 - 140.9430b) \exp[-bw(\text{SOC})]$	-1.63	0.00	21.58	[23]
	$\rho_s = 1.3774e^{-0.0413w(\text{SOC})}, [w(\text{SOC}) > 6\%]$	-1.91	0.00	22.43	[24]
	$\rho_s = 1.3900e^{-0.0630w(\text{SOC})}$	-2.21	1.34	20.49	[25]
对数多项式	$\rho_s = -0.1229 \ln w(\text{SOC}) + 1.2901, [w(\text{SOC}) < 6\%]$	-0.20	0.00	25.56	[24]

1) ρ_s 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

对表1中有关SOC模型优化求解,计算E、 P_e 、 R^2 ,结果见表6。模拟偏差位于 $\pm 15\%$ 限值之外的有线性和幂函数模型;效率系数 $E < 0.6$ 的有4个模

型。其中1个对数多项式模型实现了模拟值与实测值最大程度的拟合,E达到了0.71, P_e 为9.6%,该对数多项式模型比较适合本区域BD-SOC研究。

表6 三峡库区 SOC 与 BD 之间的回归关系

Tab. 6 Regression relationships between SOC and BD in Three Gorges Reservoir area

类型	模型	R^2	E	$P_e/\%$
线性	$\rho_s = 1.2401 - 7.4272w(\text{SOC})$	0.57	0.59	15.2
多项式	$\rho_s = 1.2712 - 9.4903w(\text{SOC}) + 22.015w^2(\text{SOC})$	0.58	0.55	9.0
对数多项式	$\rho_s = 0.1010 - 3.5634w(\text{SOC}) - 0.4404 \ln w(\text{SOC}) - 0.0431 \ln^2 w(\text{SOC})$	0.57	0.71	9.6
	$\ln \rho_s = -0.1717 + 0.3849 \ln w(\text{SOC}) - 0.1000 \ln^2 w(\text{SOC})$	0.73	0.55	14.5
指数	$\rho_s = 1.2842e^{-8.4632w(\text{SOC})}$	0.65	0.66	-14.5
幂函数	$\rho_s = 1.6600 - 0.3180w^{0.5}(\text{SOC})$	0.11	0.34	25.1

1) ρ_s 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

3 讨论

3.1 SOC-SOM 转换系数值

Van Bemmelen 转换系数(0.58)并不适用于所有地区和所有土壤。Lowther 等^[26]报道澳大利亚的

沙质土壤0~15 cm 土层内,SOC-SOM 转换系数为0.38~0.55,平均为0.46。Périé 等^[3]认为加拿大寒温带森林SOC-SOM 转换系数为0.4724($R^2 = 0.97$, $P < 0.001$)。本文SOC-SOM 转换系数为0.455,与Lowther 等^[26]研究结果相类似,可能是二者具有相似

的土壤质地。Pribyl 等^[1]认为 Van Bemmelen 转换系数仅能用于特定的土壤种类或特定的有机质组分,较符合 20 世纪 80 年代的研究情况,近期文献认为该系数值偏高^[3],这与对 SOM 和 SOC 的进一步认识以及有机质测定方法和精度的不同有关,系数取值 0.50~0.52 更为适合。

随土壤深度的增加,SOC-SOM 转换系数降低。如,Périé 等^[3]认为,随土壤深度的增加,SOC-SOM 转换系数以二次曲线形式($P = 0.013$)迅速降低;Westman 等^[27]认为芬兰原始森林土壤随深度的增加,SOC 含量下降的速度要高于 SOM, $w(\text{SOC})/w(\text{SOM})$ 比值随深度而下降,这是 SOC-SOM 转换系数随深度而下降的重要原因。Westman 等^[27]认为造成 SOC-SOM 转换系数下降的原因是 SOM 的化学成分随深度发生了变化,氨基组分(CO、COOH、COH)相对含量随深度增加而增加,即氧/碳随深度而增加,胡敏素和棕黄酸相对含量增加,SOM 趋于稳定。土壤表层 SOC-SOM 转换系数与 Van Bemmelen 系数接近,说明在定义 Van Bemmelen 系数时,没有考虑深度层的影响。SOC-SOM 转换时,要考虑地区间土壤和植被的差异,同时要评定转换系数精度,减小误差。

3.2 BD-SOM 模型

SOM 是影响土壤 BD 空间变化的主要因素,土壤 BD 与 SOM 存在回归关系,这是较为一致的结论^[1]。但是在某一地区取得的 BD-SOM 模型,并不能直接推广到其他地区。原因可能是土壤类型、土壤矿物质的差异、SOM 含量的差异以及土壤 BD 和 SOM 测定方式的差异。土壤矿物质和 SOM 含量的差异可能是模型不能通用的主要原因。

BD-SOM 模型优化求解后,误差较小、效率较高的是 Federer 有机密度模型和对数多项式模型。Périé 等^[3]在对有机密度模型和多项式模型优化求解后,也得到较为理想的模拟效果。尽管多项式模型实现了模拟值与实测值最大程度的拟合,但多项式模型各项所表达的物理含义较难解释。Federer 有机密度模型中,影响 BD 值的只有纯矿质土壤容重和纯有机质容重,结构简单,测定指标少,物理意义明确,模拟精度高,应在本研究区推广使用。

3.3 BD-SOC 模型

文献中报道的 BD-SOC 模型较 BD-SOM 少,BD-SOC 模型应用于本地区后,产生了较大的误差和较低的模拟效率。原因是 SOC 受土地利用方式、土壤类型和植被类型影响更为强烈,SOC 具有更大的空间不确定性。如曹丽花等^[18]优化的模型适用于西藏

当雄草地 SOC 的分布,徐欢欢等^[20]优化的模型适用于新疆艾比湖湿地,草地与湿地 SOC 的空间分布模式差异较大^[2];蔡晓布等^[21]甚至得出 BD 与 SOC 成正比的结论;WU 等^[24]与 Yu 等^[25]以中国土壤调查数据为基础,模拟出中国 BD-SOC 回归模型,但该模型不能直接应用于本研究区。这说明 BD-SOC 关系较为复杂,简单的线性模型并不能充分描述二者的关系。

BD-SOM 模型的 E 、 P_e 和 R^2 等统计参量均相对优于 BD-SOC 模型, BD-SOM 模型预测结果均优于 BD-SOC 模型。BD-SOM 模型经参数优化后均适用于本研究区, BD-SOC 模型中仅有 1 个模型适用。例如,对数多项式模型, BD-SOM 的 E 为 0.80, BD-SOC 的 E 为 0.71。这说明应选择 BD-SOM 模型,特别是 Federer 有机密度模型进行相关数据的完善。

参考文献:

- [1] PRIBYL D W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor [J]. Geoderma, 2010, 156(3/4): 75-83.
- [2] 田耀武, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型流域退耕地植物种类及凋落物对土壤有机碳固定的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2742-2747.
- [3] PÉRIÉ C, OUIMET R. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils [J]. Can J Soil Sci, 2008, 88(3): 315-325.
- [4] FEDERER C A, TURCOTTE D E, SMITH C T. The organic fraction-bulk-density relationship and expression of nutrient content in forest soils [J]. Can J Forest Res, 1993, 23(6): 1026-1032.
- [5] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. Glob Change Biol, 2000, 6(3): 317-327.
- [6] ADAMS W A. The effects of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils [J]. J Soil Sci, 1973, 24(1): 10-17.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版社, 2008: 25-38.
- [8] NASH J E, SUTTCILFFE J V. River flow forecasting through conceptual models: Part I: A discussion of principles [J]. J Hydrol, 1970, 10(3): 282-290.
- [9] HEUSCHER S A, BRANDT C C, JARDINE P M. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density [J]. Soil Sci Soc Am J, 2005, 69(1): 51-56.
- [10] MEERSMANS J, DE RIDDER F, CANTERS F, et al. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale

- (Flanders, Belgium) [J]. Geoderma, 2008(1/2), 143: 1-13.
- [11] TREMBLAY S, OUIMET R, HOULE D. Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Quebec, Canada[J]. Can J Forest Res, 2002, 32(5): 903-914.
- [12] CIENCIALA E, EXNEROVA Z, MACKU J, et al. Forest top-soil organic carbon content in Southwest Bohemia region[J]. J Forest Sci, 2006, 52(9): 387-398.
- [13] CHENG H, OUYANG C, HAO F X. The non-point source pollution in livestock-breeding areas of the Heihe River basin in Yellow River[J]. Stoch Environ Res Risk Assess, 2007, 21(3): 213-221.
- [14] CHIEW F H S, STEWARDSON M J, MCMAHON T A. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches [J]. J Hydrol, 1993, 147(1/2/3/4): 1-36.
- [15] HUNTINGTON T G, JOHNSON C E, JOHNSON A H, et al. Carbon, organic matter, and bulk density relationships in a forested spodosol[J]. Soil Sci, 1989, 148(5): 380-386.
- [16] PRÉVOST M. Predicting soil properties from organic matter content following mechanical site preparation of forest soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 2004, 68(3): 943-949.
- [17] 何志斌,赵文智,刘鹄,等.祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素[J].生态学报,2006,26(8):2572-2580.
- [18] 曹丽花,刘合满,赵世伟.退化高寒草甸土壤有机碳分布特征及与土壤理化性质的关系[J].草业科学,2011,28(8):1411-1415.
- [19] 秦嘉海,张勇,赵芸晨,等.黑河上游冰沟流域4种土壤有机碳分布特征与土壤特性的关系[J].干旱地区农业研究,2013, 31(5): 200-208.
- [20] 徐欢欢,曾从盛,王维奇,等.艾比湖湿地土壤有机碳垂直分布特征及其影响因子分析[J].福建师范大学学报(自然科学版),2010, 26(5): 86-93.
- [21] 蔡晓布,周进.退化高寒草原土壤有机碳时空变化及其与土壤物理性质的关系[J].应用生态学报,2009, 20(11): 2639-2645.
- [22] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].生态学报,2011, 31(18): 5207-5216.
- [23] RUEHLMANN J, KORSCHENS M. Calculating the effect of soil organic matter concentration on soil bulk density [J]. Soil Sci Soc Am J, 2009, 73(3), 876-885.
- [24] WU H B, GUO Z T, PENG C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China[J]. Glob Change Biol, 2003, 9(3): 305-315.
- [25] YU Y Y, GUO Z T, WU H B, et al. Spatial changes in soil organic carbon density and storage of cultivated soils in China from 1980 to 2000[J]. Global Biogeochem Cycle, 2009, 23(2): 416-427.
- [26] LOWTHER J R, SMETHURST P J, CARLYLE J C, et al. Methods for determining organic carbon in podzolic sands[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1990, 21(5/6): 457-470.
- [27] WESTMAN C J, HYTÖNEN J, WALL A. Loss-on-ignition in the determination of pools of organic carbon in soils of forests and afforested arable fields[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2006, 37(7/8): 1059-1075.

【责任编辑 李晓卉】