

DOI: 10.5846/stxb201411222312

柴华,何念鹏.中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义.生态学报,2016,36(13): - .

Chai H, He N P. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): - .

中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义

柴 华^{1,2}, 何念鹏^{1,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 西藏大学农牧学院, 林芝 860000

摘要: 容重是土壤最重要的物理性质之一, 不仅能反映土壤质量和土壤生产力水平, 还是区域尺度土壤碳贮量估算的重要参数。由于野外测定土壤容重费时费力, 并且操作过程也容易造成较大的误差, 因此, 土壤容重在国内外大多数清查数据库中均缺失严重。通过收集和整理中国第二次土壤普查数据、中国生态系统研究网络数据和 1980—2014 年论文内的中国土壤容重数据(共 11845 条记录), 本文系统地探讨了中国陆地生态系统土壤容重的整体分布特征、垂直分布特征以及不同土壤类型间的差异。分析结果表明: 中国陆地生态系统的土壤容重数据整体呈正态分布, 平均值为 $(1.32 \pm 0.21) \text{ g/cm}^3$, 中值为 1.35 g/cm^3 ; 土壤容重随土层深度增加而增加, 两者间表现为显著的幂函数关系。土壤容重与有机质含量呈显著的正相关关系, 与沙粒含量的负相关关系较弱。此外, 不同土壤类型间的土壤容重差异较大, 高山土平均容重最低 (0.93 g/cm^3), 而盐碱土平均容重最高 (1.41 g/cm^3)。总之, 本文不仅较全面地阐释了中国陆地生态系统土壤容重的基本特征及其变异规律, 其结论还将为准确评估区域乃至全国土壤碳贮量提供重要参数。

关键词: 碳贮量; 频率分布; 土壤类型; 土壤容重; 土壤深度

Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale

CHAI Hua^{1,2}, HE Nianpeng^{1,*}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Agriculture and Animal Husbandry College of Tibet University, Linzhi 860000, China

Abstract: Soil bulk density (BD, g/cm^3) is one of most important properties of soil. BD can be used to characterize the conditions of soil quality and soil productivity and is an important parameter used for estimation of soil carbon storage within a plot or on regional and national scales. In practice, the common methods used to measure BD in the field are laborious and expensive, particularly for deeper soil layers. Moreover, it is difficult to control the quality of BD data when classical protocols utilizing soil cores are used. Therefore, large-scale field investigations of BD have not been conducted, resulting in a deficiency of BD data in databases in China and other countries. In this study, we collected BD data (11845 records) for Chinese terrestrial ecosystems from sources including the database of China's Second National Soil Survey, the database of the Chinese Ecosystem Research Network, and public publications from 1980 to 2014 in order to explore the properties of BD on a national scale and to identify general changes in BD with soil depth and types. The results showed that the reported BD data in China were normally distributed across all soil types and at different soil depths. The mean and median values of BD were $1.32 \pm 0.21 \text{ g/cm}^3$ and 1.35 g/cm^3 , respectively. BD increased with increasing soil depth along the soil profile,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31270519, 31470506); 中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题 (XDA05050X0X) 资助; 中科院地理资源所可贞杰出青年学者项目 (2013RC102)

收稿日期: 2014-11-22; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: henp@igsnr.ac.cn

which could be well depicted by power functions. There was a significant positive correlation between BD and soil organic matter content and a weak negative correlation between BD and sand content. Furthermore, the values of BD seemed to vary among different soil types, and the mean values of BD ranged from 0.93 g/cm^3 (alpine soil) to 1.41 g/cm^3 (alkali-saline soil). In summary, our study demonstrated the patterns of BD distribution among different soil depths and types on a national scale, and the findings may be used to estimate soil carbon storage both regionally and nationally.

Key Words: carbon storage; distribution frequency; soil type; soil bulk density; soil depth

土壤容重是指一定容积内(包括土壤孔隙)的土壤重量,单位通常为 g/cm^3 。土壤容重是最重要的土壤物理性质之一,不仅可以较准确地反映土壤物理性状的整体状况^[1],还可有效地指示土壤质量和土壤生产力^[2]。土壤容重的变化与土壤孔隙度密切相关,可较好地反映土壤透气性、入渗性能、持水能力和溶质迁移潜力等^[3-4]。过大的土壤容重常会抑制植物叶片生长,降低植物光合速率或地上生产力^[5-7]。除了上述物理和生物功能外,土壤容重还是估算土壤持水力和导水性的关键参数^[8-9]。此外,土壤容重是估算土壤有机碳贮量的重要参数^[10],甚至被认为是区域及至全球尺度土壤有机碳贮量估算不确定性的的重要因素之一^[11]。

测定土壤容重的经典方法为环刀法^[12-13]。环刀法需要先挖掘标准的土壤剖面,因此在实际操作上费时费力;在岩石和根系较多、土壤太干或砂粒太多等情况下,环刀法常难以实施^[14-15]。此外,环刀法还受人为操作过程、称量和后期土壤水分测定等多种因素的影响,使测试结果存在较大的不确定性^[16]。因此,尽管土壤容重是非常重要的土壤属性(或参数),在国内外大尺度的土壤清查数据中土壤容重缺失严重^[10]。例如,我国最大规模的全国第二次土壤普查,也未系统地测定土壤容重;因此,科学家在估算全国土壤碳贮量时大多只能采用土壤容重传递函数来估算对应的土壤容重,是不同评估结果存在较大不确定性的重要原因之一^[17]。

本文收集和整理了第二次全国土壤普查数据、中国生态系统研究网络(CERN)数据和1980—2014年公开发表论文的数据(共11845条土壤容重数据),探讨了中国陆地生态系统土壤容重的基本特征与规律。主要目的:1)阐明我国土壤容重的整体分布特征;2)探讨不同土壤类型间土壤容重的差异;3)通过探讨土壤容重特征,为准确估算区域或全国土壤碳贮量提供基础数据的支撑。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

本文所使用的土壤容重数据主要来自三个方面:1)中国第二次土壤普查数据,包括6卷《中国土种志》和地方土种志;2)CERN的36个野外生态站的长期监测数据;3)1980—2014年公开发表的中国陆地生态系统土壤容重数据。在收集土壤容重数据的同时,我们还收集了各个取样点的地理坐标、土壤类型、土地利用类型和土层深度等信息。

1.2 数据处理

为了数据的规范性以及考虑到研究结果的准确性,尽量避免特殊环境(干旱和潮湿)对土壤容重测定结果的干扰,参考Wu等^[18]和Yang等^[19]研究,采用介于 $0.4 - 2 \text{ g/cm}^3$ 的土壤容重数据;共获得11845个土壤容重数据,这些数据来自3361个样地的4529个土壤剖面(图1)。我们收集的容重数据来源于土壤发生层(土种志)和土壤标准深度取样(其它数据源),在分析土壤容重整体特征及其垂直分布特征前,需要对土壤容重数

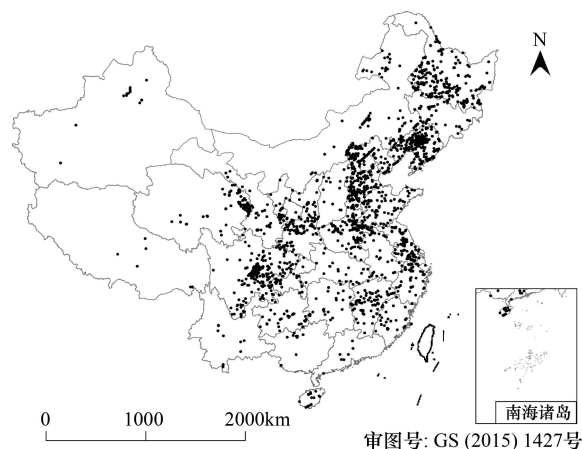


图1 土壤容重取样点的分布图

Fig.1 The distribution of sampling sites for soil bulk density in this study

据进行规范化处理。首先,我们获取所报道土壤容重数据的土壤剖面分布的平均深度,根据土壤容重数据的平均深度,按容重数值与深度分布特征的加权平均推算每 20cm 的土层厚度标准化土壤容重数据(1m 剖面划分为 5 层)。在分析过程中,我们结合我国第二次土壤普查所用的土壤分类系统,将土壤划分为 12 个土纲(分别为人为土、半水成土、初育土、淋溶土、半淋溶土、铁铝土、钙层土、盐碱土、高山土、水成土、干旱土和漠土),探讨了不同土壤类型间土壤容重的差异。

利用回归分析探讨了土壤容重的剖面特征,显著性差异水平为 $P = 0.05$ 。统计分析方法和图表利用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 完成。

2 实验结果

2.1 中国土壤容重基本特征和剖面分布

中国陆地生态系统的土壤容重在数值上符合正态分布特征($P < 0.001$),峰度和偏度分别为 1.07 和 -0.75;全国土壤容重平均值和中值分别为 1.32 和 1.35 g/cm^3 (图 2)。在 0—100 cm 土壤垂直剖面,不同土层的容重也呈正态分布(all $P_s < 0.001$),峰度值介于 0.74—2.98 之间,偏度值介于 -1.07—-0.61 之间(图 3)。容重随土层深度增加而增大,最低值出现在 0—20 cm (1.28 g/cm^3),最高值出现在 80—100 cm (1.42 g/cm^3),容重与土壤深度的关系可用幂函数拟合($R^2 = 0.90$, $P = 0.015$)。

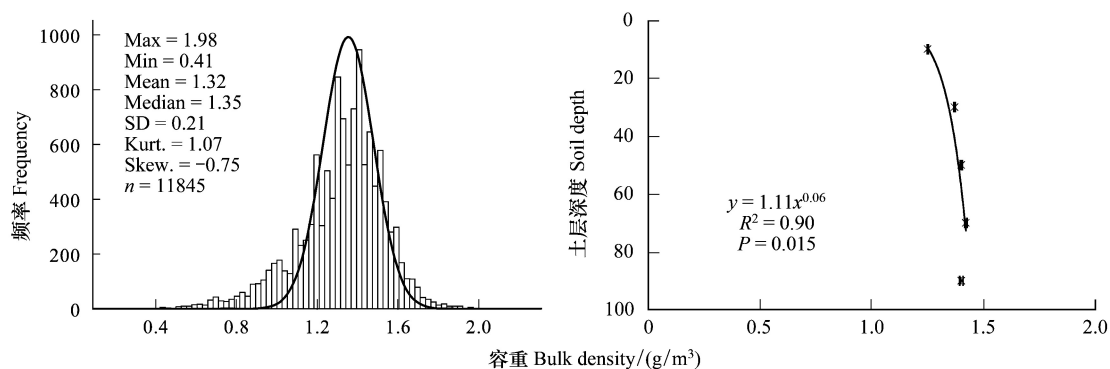


图 2 中国陆地生态系统土壤容重频率分布和剖面特征

Fig.2 The frequent properties of soil bulk density and its vertical distribution with soil depth in Chinese terrestrial ecosystems

2.2 不同土壤类型的土壤容重及其剖面分布特征

土壤容重在不同土壤类型间差异非常大,平均值的变化范围为 0.93 g/cm^3 至 1.41 g/cm^3 (图 4);其中,最低为高山土,最高为盐碱土。土壤容重平均值和中值在不同土壤类型具体表现为:人为土(1.35 和 1.37 g/cm^3)、半水成土(1.37 和 1.38 g/cm^3)、初育土(1.39 和 1.40 g/cm^3)、淋溶土(1.28 和 1.33 g/cm^3)、半淋溶土(1.28 和 1.32 g/cm^3)、铁铝土(1.30 和 1.32 g/cm^3)、钙层土(1.35 和 1.36 g/cm^3)、盐碱土(1.41 和 1.40 g/cm^3)、高山土(0.93 和 0.94 g/cm^3)和水成土(1.21 和 1.28 g/cm^3)。整体而言,不同土壤类型的土壤容重基本都随着深度增加而增大(图 5)。由于干旱土和漠土的土壤容重数据较少,本文未分析其频度分布特征。

土壤有机质(0.77%—9.61%)与沙粒(37.91%—57.07%)在不同土壤类型之间存在显著差异,其中高山土、干旱土和漠土的沙粒含量缺失。通过进一步分析我们发现:土壤容重与土壤有机质含量存在显著的负相关关系,而与沙粒含量存在弱的正相关关系。

3 讨论

3.1 成土因素和土壤母质对土壤容重的影响

中国土壤容重整体符合正态分布特征,平均值约为 1.32 g/cm^3 ;然而,土壤容重在不同土壤类型间存在较大差异(0.93—1.41 g/cm^3)。19 世纪后期,俄国土壤学奠基人道库恰耶夫提出了“成土因素学说”,即土壤发

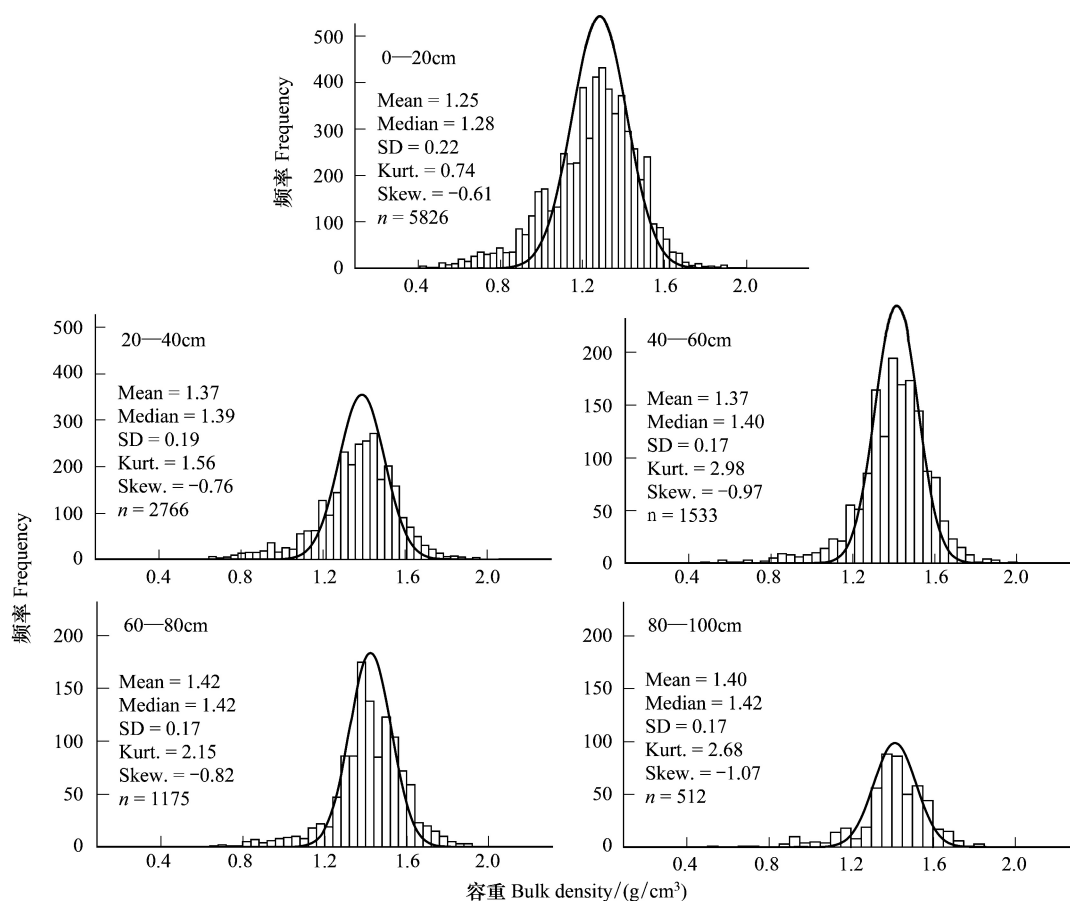


图3 不同土层深度的土壤容重频率特征

Fig.3 The frequency distribution of soil bulk density in different soil depth

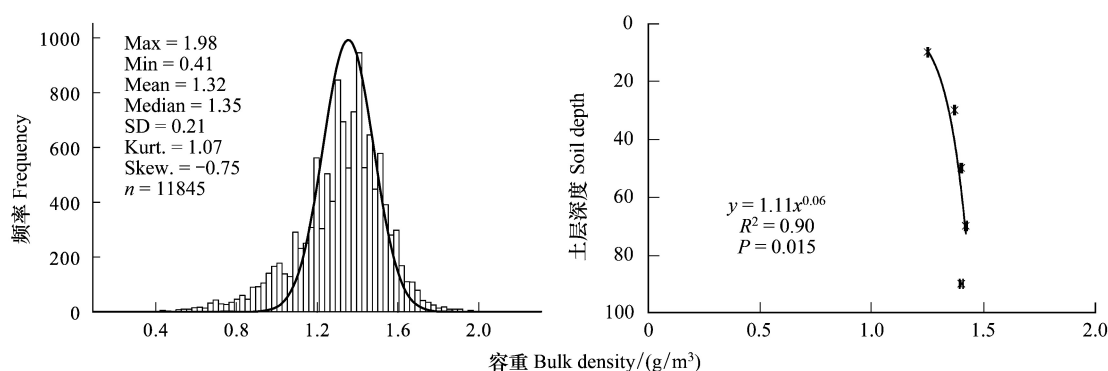


图4 不同土壤类型的土壤容重频率分布特征

Fig.4 The frequent distribution of soil bulk density in different soil types

生是在母质、气候、地形、生物和时间等诸多因素共同作用下的产物;1966年,科学家将人为活动也界定为了成土因素之一^[20]。郑纪勇等^[3]指出:成土母质、成土过程、气候、生物作用以及耕作的影响使土壤容重具有非常大的变异。成土原因是土壤容重在土壤类型间差异显著的重要原因。不同母质由于其矿物组成和理化性质的差异影响了其风化速率,据估计花岗岩地区风化速率为 $0.173 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[21]、碳酸岩的风化速率约为 $47.5 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、硅酸岩的风化速率为 $5.6 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[22]。当然,其他成土因素也会不同程度地影响土壤风化速率,并对土壤容重造成影响。此外,土体在各成土因素的作用下富集、损失、转化和迁移等成土过程及其相互作用^[23],共同形成了陆地表面各种不同的土壤^[24-25]。

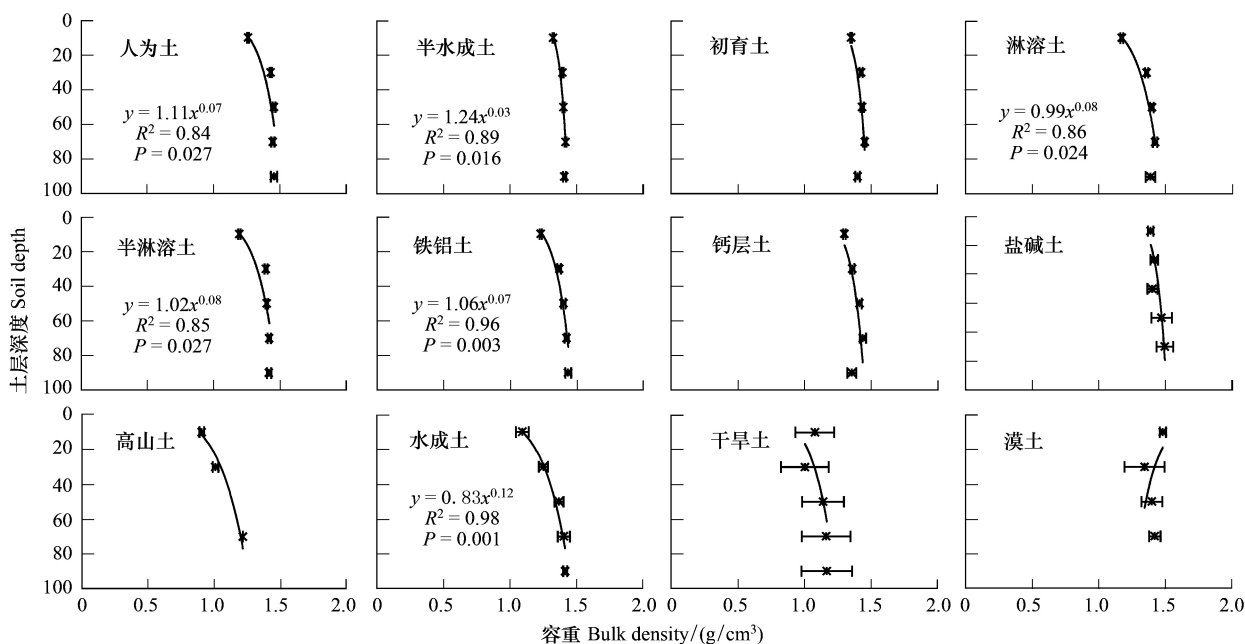


图 5 不同土壤类型的土壤容重垂直分布特征

Fig.5 The vertical distribution of soil bulk density with soil depth in different soil types

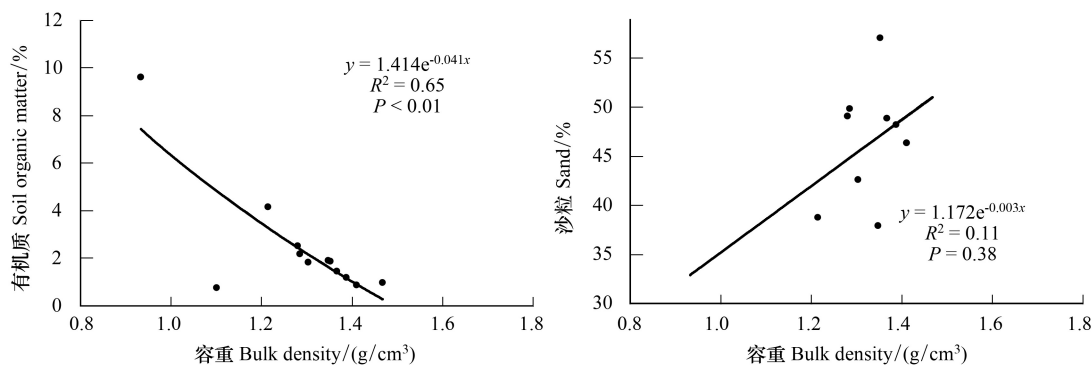


图 6 不同土壤类型容重与有机质含量和沙粒含量的关系

Fig.6 The relationships between bulk density and soil organic matter and sand in different soil types

3.2 土壤结构对土壤容重的影响

土壤结构是在干湿冻融交替等自然物理过程作用下,由有机物和矿物颗粒等土壤成分参与下形成的不同大小的多孔单元^[26]。不同土壤类型之间土壤有机质含量和沙粒含量存在较大的差异,这与陈雅敏等^[27]对我国不同土壤类型有机质含量的研究结果类似。Calhoun 等^[28]表示碳含量和土壤质地对容重变化的解释度通常超过 50%。结果显示,不同土壤类型容重与有机质之间存在着显著的负相关关系。土壤有机质含量对土壤结构具有重要影响,是造成不同土壤类型间土壤容重明显差异的重要原因^[2,29]。以高山土为例,高山土容重平均为 0.93 g/cm^3 ,在各类土壤中最低;主要是由于高山土主要分布于海拔较高的区域,其寒冷的气候特征不易于有机质的分解,从而使土壤有机质含量较高,造成土壤容重较低。由于无机胶体在土壤中的变化很小,因此有机胶体对改善土壤质量具有重要重要,是调节土壤微团聚体组成比例的重要途径^[30]。有机质改变了土壤颗粒的胶结状况,同时有机质具有很强的吸水性^[31],研究表明,有机质会对土壤孔隙度和持水量产生重要影响,从而对土壤容重产生影响^[32]。Yang 等^[19]研究表明,有机质含量可解释土壤容重 81% 的变异。土壤沙粒含量与土壤容重呈现弱相关性,随土壤沙粒含量的增加土壤容重呈升高的趋势。一些研究显示,土壤质地的差异对容重起着决定性的作用,高孔隙率土壤的容重值较低^[33-36]。当小的土壤颗粒(粉粒、粘粒)完全填

满由大土壤颗粒(沙粒)形成的空隙时会出现高的土壤容重值,土壤容重受沙粒比例的影响,沙粒比例 70—75%^[37],或 80%^[36]时容重值达到最大。

3.3 土壤容重的剖面分布特征

土壤容重沿 0—100 cm 土壤剖面呈现出从低到高的趋势。这与其他研究者的研究结果类似^[2,36]。土壤有机质是改变土壤空隙结构的重要聚合体,直接影响土壤矿物的结构^[38];我们的研究结果表明土壤有机质含量与土壤容重存在显著的负相关关系,这与 Suuster 等^[2]研究结果相同。随着土层深度的增加,土壤有机质含量逐渐降低^[39-40],是造成土壤容重随土壤深度增加逐渐增大的主要原因。此外,随着土壤剖面深度的增加,土体由于超负荷的压力而变得更加坚实,也是造成土壤容重沿土壤剖面逐渐增大的重要原因^[36]。

3.4 土壤容重估算对区域碳贮量评估的意义

了解全国尺度和不同土壤类型的土壤容重分布特征及其剖面分布特征,对准确评估区域乃至全国的土壤碳贮量具有重要意义。由于大量获取土壤容重是一项非常费时费力的工作^[9,41],因此,我国土壤基础数据库中容重数据非常缺乏。在计算任意尺度的土壤碳贮量时,土壤容重均是最重要的基础参数,因此被认为是影响区域土壤有机碳贮量估算精度的重要原因^[10, 17, 42]。通过对本文数据和结论的合理利用,研究人员一方面可以对拟使用的土壤容重数据进行初步质量控制、并甄别特异值;另一方面,科研人员可直接使用本文的结果、或用于插补部分缺失值,这对土壤容重难以准确获取的区域或深层土壤尤为重要。必须指出:本研究所使用的土壤容重数据源自不同数据库,其取样时间跨度较长、且容重测量标准存在一定的差异,使我们结论存在一定的局限性和不确定性。此外,土地利用方式和植被类型对土壤容重也具有重要的影响,但受数据的限制,本研究无法进一步深入探讨相关问题,希望在未来的研究中可以对不同土地利用方式和植被类型土壤容重进行深入研究。在实际使用过程中,研究人员仍需根据实际情况再结合本文结论选取合适的土壤容重值。总之,本文较系统地定量评估了中国土壤容重频度特征和剖面分布特征,并提供了不同土壤类型的土壤容重参考值,为准确估算区域或全国土壤碳贮量提供了重要参考。

参考文献(References):

- [1] Saini G R. Organic matter as a measure of bulk density of soil. *Nature*, 1966, 210(5042): 1295-1296.
- [2] Suuster E, Ritz C, Roostalu H, Reintam E, Kölli R, Astover A. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. *Geoderma*, 2011, 163(1/2): 74-82.
- [3] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53-56.
- [4] 李志洪, 王淑华. 土壤容重对土壤物理性状和小麦生长的影响. *土壤通报*, 2000, 31(2): 55-57.
- [5] Oussible M, Crookston R K, Larson W E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agronomy Journal*, 1992, 84(1): 34-38.
- [6] Andrade A, Wolfe D W, Fereres E. Leaf expansion, photosynthesis, and water relations of sunflower plants grown on compacted soil. *Plant and Soil*, 1993, 149(2): 175-184.
- [7] 刘晚苟, 山仑. 不同土壤水分条件下容重对玉米生长的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1906-1910.
- [8] Kaur R, Kumar S, Gurung H P. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40(5): 847-858.
- [9] Benites V M, Machado P L O A, Fidalgo E C C, Coelho M R, Madari B E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 2007, 139(1/2): 90-97.
- [10] Sequeira C H, Wills S A, Seybold C A, West L T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*, 2014, 213(1): 64-73.
- [11] Dawson J J C, Smith P. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of the Total Environment*, 2007, 382(2/3): 165-190.
- [12] Huntington T G, Johnson C E, Johnson A H, Siccama T G, Ryan D F. Carbon, organic-matter, and bulk-density relationships in a forested spodosol. *Soil Science*, 1989, 148(5): 380-386.
- [13] Rawls W J. Estimating soil bulk-density from particle-size analysis and organic-matter content. *Soil Science*, 1983, 135(2): 123-125.
- [14] Mouazen A M, Ramon H. Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture

- content. *Soil and Tillage Research*, 2006, 86(2): 218-229.
- [15] Quraishi M Z, Mouazen A M. Calibration of an on-line sensor for measurement of topsoil bulk density in all soil textures. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 219-228.
- [16] 王贵连, 苗党生. 浅谈土壤容重的测定. *北京农业*, 2012, (3): 86-86.
- [17] He N P, Yu Q, Wu L, Wang Y S, Han X G. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(12): 2952-2959.
- [18] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1048, doi: 10.1029/2001GB001844.
- [19] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, Zhou R, Fang J Y. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2): 131-141.
- [20] Yaalon D H, Yaron B. Framework for man-made soil changes - an outline of metapedogenesis. *Soil Science*, 1966, 102(4): 272-277.
- [21] Riebe C S, Kirchner J W, Finkel R C. Erosional and climatic effects on long-term chemical weathering rates in granitic landscapes spanning diverse climate regimes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(3/4): 547-562.
- [22] Li S Y, Xu Z F, Wang H, Wang J H, Zhang Q F. Geochemistry of the upper Han River basin, China 3: Anthropogenic inputs and chemical weathering to the dissolved load. *Chemical Geology*, 2009, 264(1/4): 89-95.
- [23] Simonson R W. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Science Society of America Journal*, 1959, 23(2): 152-156.
- [24] 盛浩, 周清, 黄运湘, 廖超林, 张杨珠. 中国亚热带山地土壤发生特性和系统分类研究进展. *中国农学通报*, 2015, 31(5): 143-149.
- [25] Phillips J D, Marion D A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 73-89.
- [26] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 1988, 11(3/4): 199-238.
- [27] 陈雅敏, 冯述青, 杨天翔, 张伟倩, 王寿兵. 我国不同类型土壤有机质含量的统计学特征. *复旦学报*, 2013, 52(2): 220-224.
- [28] Calhoun F G, Smeck N E, Slater B L, Bigham J M, Hall G F. Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(3): 811-819.
- [29] Alexander E B. Bulk densities of california soils in relation to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(4): 689-692.
- [30] Alakukku L. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil and Tillage Research*, 1996, 37(4): 223-238.
- [31] Davidson S E, Page J B. Factors influencing swelling and shrinking in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1956, 20(3): 320-324.
- [32] 王益, 王益权, 刘军, 闫亚丹, 高希望. 黄土地区影响土壤膨胀因素的研究. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(5): 93-97.
- [33] Adams W A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science*, 1973, 24(1): 10-17.
- [34] Gardner W R. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. *Soil Science*, 1970, 110(3): 218-218.
- [35] Pachepsky Y A, Rawls W J, Lin H S. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, 2006, 131(3/4): 308-316.
- [36] Tranter G, Minasny B, Mcbratney A B, Murphy B, McKenzie N J, Grundy M, Brough D. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use and Management*, 2007, 23(4): 437-443.
- [37] Koltermann C E, Gorelick S M. Fractional packing model for hydraulic conductivity derived from sediment mixtures. *Water Resources Research*, 1995, 31(12): 3283-3297.
- [38] Stewart V I, Adams W A, Abdulla H H. Quantitative pedological studies on soils derived from silurian mudstones 2 relationship between stone content and apparent density of fine earth. *Journal of Soil Science*, 1970, 21(2): 248-255.
- [39] Hobley E, Willgoose G R, Frisia S, Jacobsen G. Environmental and site factors controlling the vertical distribution and radiocarbon ages of organic carbon in a sandy soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(8): 1015-1026.
- [40] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [41] Heuscher S A, Brandt C C, Jardine P M. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 51-56.
- [42] He N P, Zhang Y H, Dai J Z, Han X G, Baoyin T G T, Yu G R. Land-use impact on soil carbon and nitrogen sequestration in typical steppe ecosystems, Inner Mongolia. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(5): 859-873.