

文章编号: 1008-2786-(2019)2-198-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000413

黑河上游山地土壤容重分布特征及影响因素

张梦旭^{1,2}, 刘蔚^{1*}, 朱猛^{1,2}, 杨林山¹, 李若麟¹

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 土壤容重不仅可用作计算土壤持水力和导水性, 也是估算土壤养分和碳储量的重要变量。野外测定土壤容重一般费时费力, 特别是在地形复杂的山区, 因此山地土壤容重在国内外大多数清查数据库中缺失。本文以黑河上游山地为例, 基于野外调查的 124 个土壤剖面, 研究了山地土壤容重的空间分布特征及影响因素。结果表明: 黑河上游山地 0~10 cm 和 0~60 cm 土壤容重分别为 $0.91 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.04 \pm 0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 不同植被类型下, 高山寒漠容重最大, 山地森林最小。随着土壤深度的增加, 容重呈幂函数递增; 随着土壤有机质含量的增加, 容重呈指数递减。区域上, 黑河上游从西北到东南, 容重呈递减趋势, 从高海拔到低海拔, 容重呈先减小后增大趋势。主成分分析 (PCA) 和一般线性模型 (GLM) 表明, 与土壤容重相关的环境因子中, 海拔是影响土壤表层容重的第一主成分, 土壤有机质含量是第二主成分, 黏粒含量和大于 2.0 mm 砾石含量分别为第三、四主成分。第一、二、三、四主成分分别解释土壤容重空间变异的 24.00%、29.40%、0.01%、6.20%。

关键词: 土壤容重; 空间分布; 影响因素; 黑河上游

中图分类号: P942

文献标志码: A

土壤容重是一项描述土壤压实度的指标。它表示一定体积内土壤干物质重量, 单位通常为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。它是评价土壤质量, 估算土壤养分和碳储量的重要变量^[1,2]。土壤容重通过影响入渗、生根深度、持水能力、土壤孔隙度和通气量以及微生物活性来影响土壤过程和生产水平。准确、完整的土壤容重数据可为区域土地资源管理、生态及水文模型参数输入、碳储量的准确估算提供数据基础^[3]。

环刀法^[4]是测定土壤容重的传统方法。它需要先挖掘标准的土壤剖面, 因而在实际操作时, 往往

费时费力, 且操作过程也容易造成较大的误差^[5]。在地形起伏较大的山区, 交通不便, 土壤容重数据往往难以获取, 土壤空间异质性较大, 较少的采样点不能反映容重的空间分布特征^[6]。基于以上原因, 目前国内外大尺度的土壤清查数据中容重数据仍缺失^[7,8]。在高海拔山地, 容重数据的缺失给区域土壤碳储量的估算带来了不确定性。因此, 基于野外调查的山区土壤容重数据, 可以更好地理解山地土壤容重空间分布特征及其影响因素, 从而为准确估算山区土壤碳储量提供基础数据的支撑^[9]。

收稿日期 (Received date): 2018-05-05; **改回日期** (Accepted date): 2019-04-09

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41771252); 中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDJ-SSW-DQC031); 甘肃省国际科技合作类项目 (17YF1WA168); 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开放基金 (LPCC2017005)。[National Natural Science Foundation of China General Program (41771252); Key Research Program of Frontier Science, CAS (QYZDJ-SSW-DQC031); Projects of International Science and Technology Cooperation, Gansu Province (17YF1WA168); Opening Fund of Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, CAS (LPCC2017005)]

作者简介 (Biography): 张梦旭 (1994-), 男, 陕西潼关人, 硕士研究生, 主要研究方向: 半干旱区山地生态系统碳循环。[ZHANG Mengxu (1994-), male, born in Tongguan, Shaanxi Province, M. Sc. candidate, research on carbon cycle of mountain ecosystem in semiarid area] E-mail: zhangmx123@lzb.ac.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 刘蔚 (1969-), 女, 陕西横山人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 干旱区环境及水土化学。[LIU Wei (1969-), female, born in Hengshan, Shaanxi Province, Ph. D., professor, specialized in arid area environment and soil and water chemistry] E-mail: weilu@lzb.ac.cn

黑河上游位于我国西北地区祁连山中段,属典型的高寒半干旱山区,该区集水面积 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔 1700 ~ 4823 m,其中 50% 的区域分布在海拔 3700 m 以上^[10]。区域地形复杂,水热梯度明显,植被呈现明显的垂直地带性。下垫面的强异质性使得该区成为研究复杂地形条件下土壤容重空间分布特征及其影响因素的理想区域。因此,基于野外调查数据^[11],结合黑河流域土壤有机碳含量数据集^[12],本文研究了黑河上游不同植被类型及土层深度下的土壤容重空间分布特征,绘制了区域土壤容重空间分布图,并分析了影响容重的主要环境因子,为区域土壤容重缺失值的插补及土壤碳储量的准确估算提供数据基础^[13]。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黑河是我国西北干旱区第二大内陆河,发源于祁连山中段,流经河西走廊,最后注入内蒙古额济纳旗的索果诺尔和嘎顺诺尔,流域总面积为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本文以黑河干流上游山地为研究区(图1),地理位置介于 $37^\circ 30' \sim 39^\circ 41' \text{ N}$, $97^\circ 28' \sim 101^\circ 16' \text{ E}$ 之间,包括青海省祁连县和甘肃省肃南裕固族自治县的大部分地区。研究区气候阴湿寒冷,为高寒干旱半干旱气候,多年平均气温 $-5^\circ \text{C} \sim 4^\circ \text{C}$,年平均降水量 300 ~ 600 mm。植被分布具有

明显的垂直地带性,随着海拔升高,依次分布着山地荒漠草原带(1900 ~ 2300 m)、干性灌丛草原带(2300 ~ 2500 m)、森林草原植被带(2500 ~ 3300 m)、亚高山灌丛草甸带(3300 ~ 3600 m)、高山草甸带(3600 ~ 4200 m),海拔 4200 m 以上为高山寒漠和冰川。研究区主要土壤类型有高山寒漠土、高山草甸土、高山草原土、亚高山灌丛草甸土、亚高山草原土、灰褐土、黑钙土、栗钙土、棕钙土、灰钙土、灰漠土。

1.2 野外调查

2012—2013 年,以黑河上游各生态站、观测点和样地为主线,布设黑河流域生态水文样带,沿水流方向调查水文、土壤、植被等要素^[11],采样点分布见图1。在每个采样点,获取经纬度、海拔、植被类型、坡向、坡度等信息,并挖掘土壤剖面 2 ~ 3 个,每个间距 5 m,按照 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 进行土壤取样。容重获取采用环刀法,用于土壤化学性质分析的土样采用土钻法。由于山区土层较薄,部分土壤剖面 60 cm 以下砾石较多,本文在分析土壤容重随深度变化时,主要关注 0 ~ 60 cm。

1.3 数据计算与分析

本文根据野外调查数据,得出黑河上游山地土壤容重与土壤有机质含量的经验方程。结合黑河流域三维土壤有机碳含量分布数据集^[12](寒区旱区科学数据中心, <http://westdc. westgis. ac. cn/data/>)

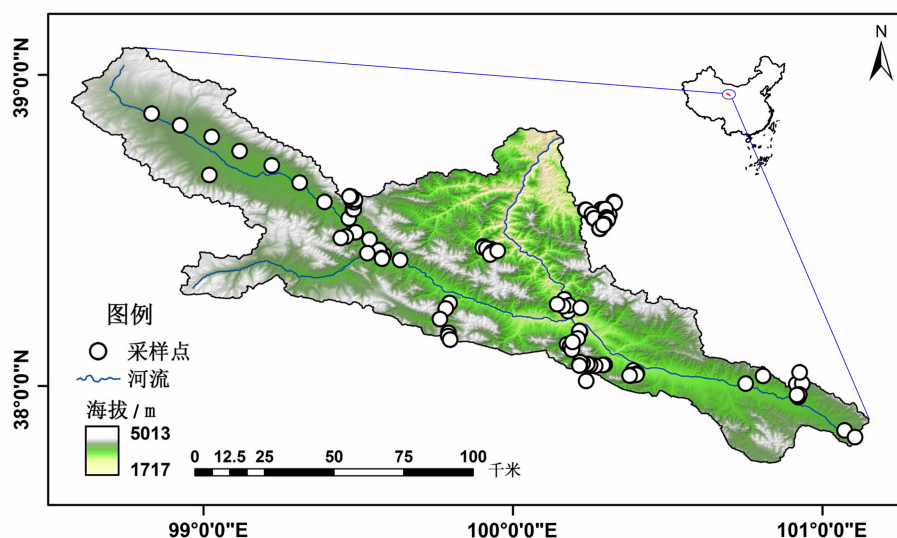


图1 研究区位置和采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

a69ab6e2 - 886a - 4ef3 - 8470 - 3817c964df0a), 得出容重空间分布图。由于黑河流域土壤有机碳含量数据集采用的分层为 0 ~ 5、5 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 60、60 ~ 100 cm, 与本文不同, 因此采用深度加权并求和的方法^[2] (例如, 0 ~ 10 cm 与 0 ~ 5 和 5 ~ 15 cm 各重叠了 5 cm, 因此在这两个深度上的权重均为 $0.5 = 5 \text{ cm} / 10 \text{ cm}$, 则 0 ~ 10 cm 深度有机碳含量就是 $0.5\text{SOC}_{0 \sim 5 \text{ cm}} + 0.5\text{SOC}_{5 \sim 15 \text{ cm}}$, 其中 SOC 为土壤有机碳含量), 获取研究区 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 四个深度土壤有机碳含量数据。

黑河上游山地温度和降水与经纬度和海拔关系密切, 气候数据由以下经验公式推算^[14]:

$$T = -3.85 - 0.006Ele + 0.26Lon + 0.18Lat;$$

$$R^2 = 0.94 \quad (1)$$

$$P = -704.2 + 0.12Ele + 0.12Ele + 20.1Lon - 35Lat;$$

$$R^2 = 0.77 \quad (2)$$

式中: T 为年平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), P 为年平均降水量 (mm), Ele 为海拔高度 (m), Lon 为经度, Lat 为纬度。

采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 考察不同植被类型下土壤容重的差异, 差异显著时 ($P < 0.05$) 采用新复极差法 (Duncan) 进行多重比较。在分析影响土壤容重的环境因子时, 考虑到因子间的相关性, 采用主成分分析 (PCA) 进行降维, 然后利用一般线性模型 (GLM) 考察各主成分对土壤容重空间变异的贡献率。所有统计分析在 SAS 9.2 软件 (SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) 中进行。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤容重特征

黑河上游山地 0 ~ 10 cm 土壤容重均值为 $0.91 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (\pm 表示加减标准差, 反应数据离散程度, 下同), 且不同植被类型下土壤容重差异显著, 由低到高排列为: 山地森林 ($0.75 \pm 0.04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、亚高山灌丛草甸 ($0.77 \pm 0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、山地草甸草原 ($0.85 \pm 0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、高山草甸 ($0.89 \pm 0.06 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、亚高山草甸 ($0.99 \pm 0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、山地草原 ($1.03 \pm 0.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、山地荒漠草原 ($1.19 \pm 0.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、高山寒漠 ($1.22 \pm 0.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) (图 2)。黑河上游山地 0 ~ 60 m 土

壤容重均值为 $1.04 \pm 0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。不同植被类型下土壤容重均随深度的增加而增大, 且可以用幂函数来描述这种关系, 拟合方程的可决系数在 0.95 以上 (图 3)。

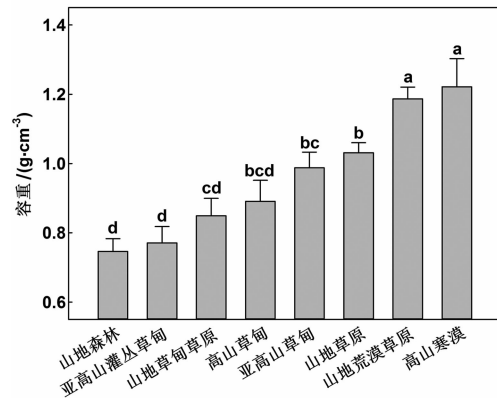


图 2 不同植被类型 0 ~ 10 cm 土壤容重

Fig. 2 Soil bulk density (0 ~ 10 cm) in different vegetation types

注: 不同小写字母表示均值差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2 土壤容重的空间分布

土壤有机质含量是指示土壤容重的重要变量。由图 4 可知, 黑河上游山地土壤容重与有机质含量的关系可以表示为 $BD = 1.37 \exp(-0.04SOM)$; $R^2 = 0.51$, $P < 0.01$ (BD 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), SOM 为土壤有机质含量 (%), 土壤有机质含量 = $1.724 \times$ 土壤有机碳含量)。利用该关系式, 结合黑河流域三维土壤有机碳含量数据集, 可以得到研究区不同深度土壤容重的空间分布图 (图 5)。整体上, 土壤容重的空间分布呈现从西北向东南递减的趋势; 随着海拔的降低, 土壤容重基本呈现一种先降低再升高的趋势, 特别在流域出水口附近, 土壤容重值达到最大。另外, 谷底和坡面、坡顶土壤容重差异明显, 阴坡土壤容重小于阳坡。土壤容重随深度的增加而变大, 且各层容重空间分布相似。

2.3 土壤容重与环境因子关系

相关分析结果表明, 0 ~ 10 cm 土壤容重与土壤有机质含量呈显著负相关关系, 相关系数为 -0.72 ($P < 0.01$), 在所有环境因子中相关性最强; 另外, 土壤容重还与坡向余弦呈显著负相关关系 ($P < 0.01$); 与植被类型、 $> 2 \text{ mm}$ 砾石含量、海拔、年平均温度呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 与年平均降水量、坡度、黏粒含量的相关性不显著。

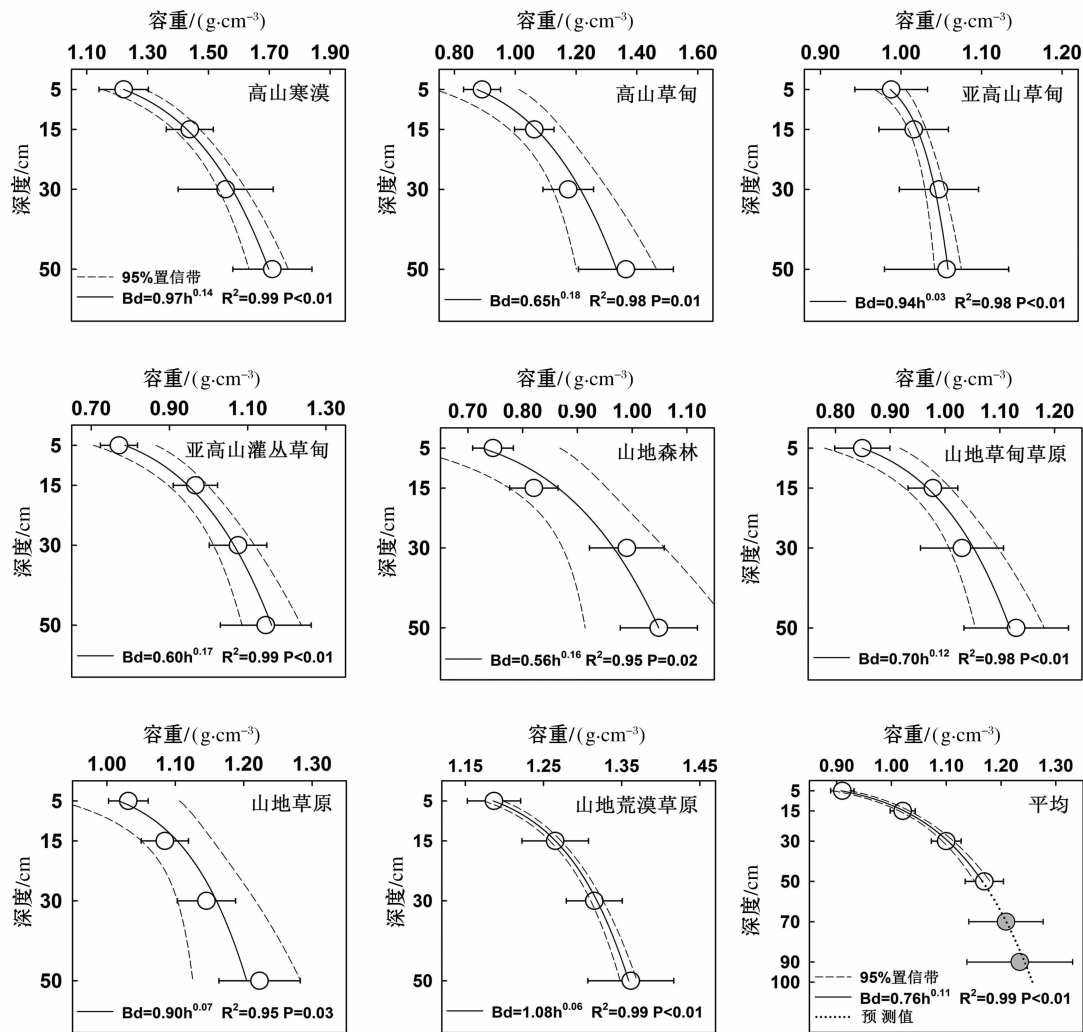


图3 不同植被类型土壤容重与土层深度关系

Fig. 3 Relationships between soil bulk density and soil depth in different vegetation types

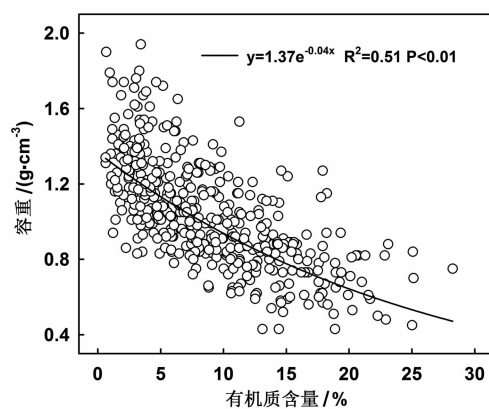


图4 土壤容重与土壤有机质含量的关系

Fig. 4 Relationship between soil bulk density and soil organic matter

($P > 0.05$) (表1)。

利用主成分分析 (PCA) 对各环境因子进行降

维,结果表明,前四个主成分对原环境因子方差的解释率达 85.45%。表2给出了前四个主成分在不同环境因子上的载荷,由载荷值的大小可知,第一主成分主要反映了海拔主导的气候植被带,值越大表示温度越低,降水越多;第二主成分主要反映了土壤有机质含量的高低,值越大表示土壤有机质含量越高;第三主成分主要反映了土壤中黏粒含量的高低;第四主成分反映了土壤中砾石含量的高低。一般线性模型 (GLM) 表明,第一、二、三、四主成分分别解释了土壤容重空间变异的 24.00%、29.40%、0.01%、6.20%,累计解释率为 59.61% (表3)。容重与主成分的回归方程为: $BD = 0.90 + 0.07PC1 - 0.13PC2 + 0.07PC4$; $R^2 = 0.60$, $P < 0.01$ (BD 为土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$), $PC1$ 、 $PC2$ 、 $PC4$ 为第一、二、四主成分)。

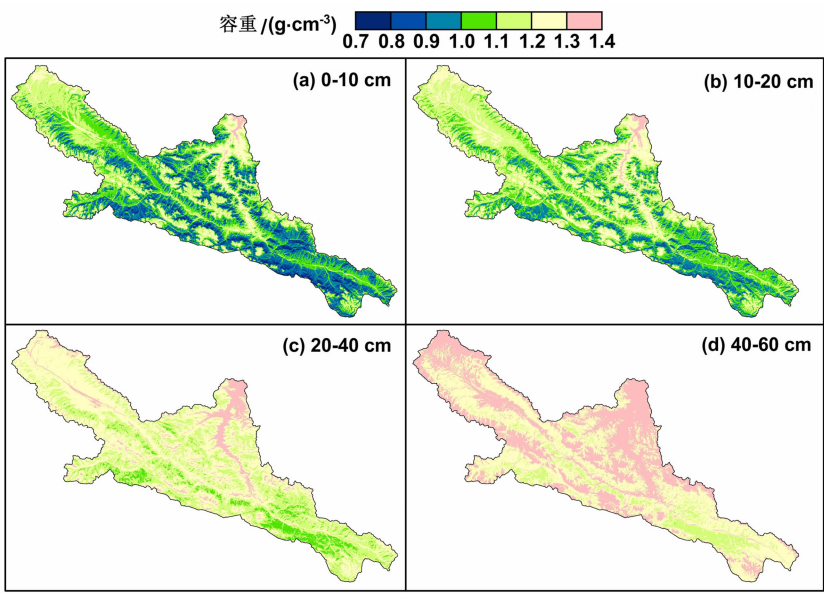


图 5 黑河上游山地不同深度土壤容重的空间分布

Fig. 5 Spatial patterns of soil bulk density for different depths in the mountainous regions of the upper Heihe River basin

表 1 土壤容重和环境因子的相关系数 (n = 52)

Tab. 1 Correlation coefficient of soil bulk density and environment factors (n = 52)

环境因子	相关系数	P 值
土壤有机质含量/%	-0.72	< 0.01
坡向余弦	-0.67	< 0.01
植被类型	0.47	< 0.01
>2.0 mm 砾石含量/%	0.33	0.02
海拔/m	0.29	0.04
年平均温度/℃	0.29	0.04
年平均降水量/mm	0.17	0.21
坡度/(°)	-0.15	0.27
黏粒含量/%	-0.13	0.37

注:由于部分土壤剖面缺乏砾石含量及机械组成数据,实际用于相关分析的样本点为 52 个。另外,植被类型为定性数据,为方便定量分析,根据其对应的容重值,由低到高排序(图 2),从山地森林到高山寒漠,分别编码为 1 到 8。

表 2 环境因子的主成分分析结果

Tab. 2 Results of principal component analysis for environmental factors

环境因子	载荷			
	PC1 (46.8%) *	PC2 (16.7%)	PC3 (11.9%)	PC4 (10.1%)
土壤有机质含量/%	-0.26	0.60	-0.03	-0.16
坡向余弦	-0.26	0.55	0.11	-0.28
植被类型	0.40	-0.22	-0.06	-0.24
>2.0 mm 砾石含量/%	0.24	0.20	0.31	0.60

续表 2

环境因子	载荷			
	PC1 (46.8%) *	PC2 (16.7%)	PC3 (11.9%)	PC4 (10.1%)
海拔/m	0.46	0.24	-0.03	-0.02
年平均温度/℃	-0.46	-0.24	0.03	0.02
年平均降水/mm	0.43	0.31	0.10	0.01
坡度/(°)	-0.19	-0.03	0.63	0.37
黏粒含量/%	-0.12	0.16	-0.69	0.59

注:PC1、PC2、PC3、PC4 为第一、二、三、四主成分,括号内数值表示各主成分的方差解释率。

表 3 各主成分对土壤容重的影响

Tab. 3 Effects of each principal component on soil bulk density

方差来源	自由度	系数	标准差	均方	F 值	贡献率(%)
第一主成分	1	0.07	0.01	1.00	27.89 **	24.00
第二主成分	1	-0.13	0.02	1.23	34.22 **	29.40
第三主成分	1	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01
第四主成分	1	0.07	0.03	0.26	7.19 **	6.20
误差	47			0.04		40.39

注: * * P < 0.01, 分析结果来自一般线性模型 (GLM)

3 讨论

3.1 不同植被类型土壤容重特征

黑河上游山地水热随海拔梯度变化明显,因而

植被分布也呈现明显的垂直地带性,坡向对太阳辐射的再分配,改变了局地水热格局,使植被类型在同一海拔带内发生变化^[15]。研究不同植被类型下土壤容重的差异,可以对研究区土壤容重的空间分布有更为直观的认识。研究结果显示,黑河上游0~10 cm不同植被类型之间土壤容重差异显著。其中,山地森林和亚高山灌丛草甸土壤容重显著低于其他植被类型($P < 0.05$);高山寒漠和山地荒漠草原土壤容重则显著高于其他植被类型($P < 0.05$)。在研究区,山地森林和亚高山灌丛草甸处于海拔2500~3600 m,对应着较高的降水(350~600 mm)和较低的年均温度($-6\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[14],植被生产力高且凋落物的分解较弱,地面积累着6~18 cm的枯枝落叶层,土壤有机质含量高,有利于土壤团粒结构的形成,因而该植被类型有着较大的土壤孔隙度和较小的容重^[16]。而高山寒漠和山地荒漠草原分别处于高海拔区($>4200\text{ m}$)和低海拔区(1900~2300 m),高海拔区气候严酷寒冷,土壤发育微弱,有机质含量低,土壤空隙较小且土中砾石较多;低海拔区年均降水量少,且年均温度较高,植被多为耐旱的荒漠草原和灌木,植被生产力低,土壤有机质累积少,土体紧实,容重较大。

3.2 土壤容重的空间分布

黑河上游0~60 cm深度下土壤容重均值为 $1.03 \pm 0.01\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,低于柴华等^[2]对全国1 m深度土壤容重均值的计算结果($1.32 \pm 0.21\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),这主要是因为研究区为高海拔山地,气候寒冷,有利于土壤有机质累积,土壤有机质含量较全国平均水平高^[17]。在整个研究区,土壤容重从西北向东南呈递减趋势,这与该区降水的水平分布趋势相吻合;在垂直方向,土壤容重随海拔降低呈先减小后增大的趋势,这与该区植被的垂直分布有关^[16]。研究区中海拔为山地森林及灌丛草甸,土壤有机质累积较多,土壤容重较低,高海拔和低海拔分别为高山寒漠及山地荒漠草原,土壤容重值较大。本研究给出了土壤容重随土壤有机质含量变化的指数函数关系式(图4),且可决系数在0.50以上,该关系式与Yang^[18]等在全国范围的研究结果一致,因而在有土壤有机质含量数据时,该经验方程可为推算区域容重缺失值提供参考,从而提高土壤碳储量估算精度。

不同植被类型下的土壤容重随着土层深度的增加而增加,这与其他研究者的研究结果类似^[2,19]。

其原因有两方面,一是与土壤容重具有显著负相关关系的土壤有机质含量随着土层深度的增加而减少,而土壤有机质是改变土壤孔隙结构的重要聚合体,直接影响土壤矿物的结构^[20],这是形成土壤容重随土层深度增加而递减的主要原因;二是随土壤剖面深度增加,土体由于超负荷压力而变得更加紧实^[21]。另外,本研究给出了研究区不同植被类型及平均土壤容重随土层深度变化的幂函数关系式(图3),该经验方程可为插补研究区土壤剖面垂直方向上容重缺失值提供参考。

3.3 土壤容重与环境因子关系

本文中容重与环境因子的相关性研究表明,土壤有机质含量与容重相关性最强,为显著负相关关系($r = -0.72$)。坡向余弦与容重具有显著负相关关系,二者相关性仅次于有机质含量。Chen^[17]等在黑河上游排露沟流域的研究发现,坡向是影响土壤有机碳含量最重要的环境因子。坡向通过改变坡面的辐射量,进而影响坡面水热过程,使得黑河上游山地阴坡主要分布灌丛及森林,而阳坡主要为草地,阴坡较高的生物量及较低的土壤温度,使得土壤有机质含量显著高于阳坡^[15,17],因此容重较阳坡更低。另外,海拔、年平均温度、植被类型和大于2.0 mm砾石含量与容重均具有显著的相关性,与新疆伊犁地区草地的相关研究结论类似^[22]。

由于各个环境因子具有一定的相关性,在利用一般线性模型进行贡献拆分时,会影响结果的稳健性^[15,23]。因此,本文先利用主成分分析得到前四个互不相关的主成分,结果表明前四个主成分可以解释原环境因子85.45%的方差,说明前四个主成分可以较好地代表原环境因子。一般线性模型结果表明,第一和第二主成分对土壤容重的空间变异的贡献率最高,分别为24.00%和29.40%。由于第一主成分在海拔上的载荷最大,第二主成分在土壤有机质含量上的载荷最大,这说明,在黑河上游山地,海拔及土壤有机质含量显著影响土壤容重的空间异质性。另外,反映土壤中大于2.0 mm砾石含量高低的第四主成分贡献了土壤容重空间变异的6.20%,说明土壤质地对容重也有一定影响,粗骨质土壤的容重偏高。

4 结论

根据野外调查数据,研究了黑河上游山地不同

植被类型下土壤容重分布特征,绘制了土壤容重的空间分布图,并分析了土壤容重与环境因子的关系,主要结论如下:

(1)黑河上游山地 0~10 cm 和 0~60 cm 土壤容重分别为 $0.91 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.04 \pm 0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;海拔对降水和温度格局的重塑,改变了山区植被生产力及土壤有机质含量格局,进而影响土壤结构,使得不同植被类型下,高山寒漠容重最大,山地森林最小。

(2)土壤有机质是改变土壤孔隙结构的重要聚合体,土壤容重随着土壤有机质含量的增加呈指数递减趋势;随着土壤深度的增加,土壤有机质含量降低且土体所受压力增大,容重随深度呈幂函数增加趋势。容重与有机质含量和深度的关系式,可用以推算容重缺失值。

(3)与土壤容重相关的环境因子中,海拔(温度)是影响土壤表层容重的第一主成分,土壤有机质含量是第二主成分,二者分别解释了容重空间变异的 24.00% 和 29.40%,是影响容重变异的两个主要因子。

参考文献 (References)

- [1] HAN Youzhi, ZHANG Jianwei, MATTSON K G, et al. Sample sizes control error estimates in determining soil bulk density in California forest soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, **80**(3): 756–764.
- [2] 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[J]. 生态学报, 2016, **36**(13): 3903–3910. [CHAI Hua, HE Nianpeng. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(13): 3903–3910]
- [3] 张建国,刘淑珍,宋述军,等. 不同土地利用方式对黄土坡地土壤水稳性团聚体和总孔隙度的影响[J]. 山地学报, 2002, **20**(S1): 119–124. [ZHANG Jianguo, LIU Shuzhen, SONG Shujun, et al. Effect of different land use on soil water-stable aggregate and soil total porosity of slope land in Loess Plateau[J]. Mountain Research, 2002, **20**(S1): 119–124]
- [4] HUNTINGTON T G, JOHNSON C E, JOHNSON A H, et al. Carbon, organic-matter, and bulk-density relationships in a forested spodosol[J]. Soil Science, 1989, **148**(5): 380–386.
- [5] QURASHI M Z, MOUAZEN A M. Calibration of an on-line sensor for measurement of topsoil bulk density in all soil textures[J]. Soil and Tillage Research, 2013, **126**: 219–228.
- [6] 马溶之. 中国山地土壤的地理分布规律[J]. 土壤学报, 1965, **13**(1): 1–7. [MA Rongzhi. General principles of geographical distribution of mountain soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1965, **13**(1): 1–7]
- [7] SEQUEIRA C H, WILLS S A, SEYBOLD C A, et al. Predicting soil bulk density for incomplete databases[J]. Geoderma, 2014, **213**(1): 64–73.
- [8] 韩光中,王德彩,谢贤健. 中国主要土壤类型的土壤容重传递函数研究[J]. 土壤学报, 2016, **53**(1): 93–102. [HAN Guangzhong, WANG Decai, XIE Xianjian. Pedotransfer functions for prediction of soil bulk density for major types of soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(1): 93–102]
- [9] HE Niangpeng, YU Qiang, WU Ling, et al. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of northern China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, **40**(12): 2952–2959.
- [10] 蓝永超,丁宏伟,胡兴林,等. 黑河山区气温与降水的季节变化特征及其区域差异[J]. 山地学报, 2015, **33**(3): 294–302. [LAN Yongchao, DING Hongwei, HU Xinglin, et al. The seasonal change characteristics of temperature, precipitation in the mountain areas of the Heihe River and their regional differences[J]. Mountain Research, 2015, **33**(3): 294–302]
- [11] 冯起,苏永红,司建华,等. 黑河流域生态水文样带调查[J]. 地球科学进展, 2013, **28**(2): 187–196. [FENG Qi, SU Yonghong, SI Jianhua, et al. Eco-hydrological transect survey of Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2013, **28**(2): 187–196]
- [12] SONG Xiaodong, BRUS D J, LIU Feng, et al. Mapping soil organic carbon content by geographically weighted regression: A case study in the Heihe River Basin[J]. Geoderma, 2016, **261**: 11–22.
- [13] 李晓晓,刘京,赵世伟,等. 西北干旱区县域农田表层土壤容重空间变异性特征[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(4): 148–151. [LI Xiaoxiao, LIU Jing, ZHAO Shiwei, et al. Spatial variation of topsoil bulk density of farmland on county level in Northwest arid area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(4): 148–151]
- [14] 贾文雄. 祁连山气候的空间差异与地理位置和地形的关系[J]. 干旱区研究, 2010, **27**(4): 607–615. [JIA Wenxiong. Study on the relationships between regional climatic difference, geographical location and terrain in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2010, **27**(4): 607–615]
- [15] ZHU Meng, FENG Qi, QIN Yanyan, et al. Soil organic carbon as functions of slope aspects and soil depths in a semiarid alpine region of Northwest China[J]. Catena, 2017, **152**: 94–102.
- [16] 牛赞,刘贤德,敬文茂,等. 祁连山北坡土壤特性与植被垂直分布的关系[J]. 山地学报, 2013, **31**(5): 527–533. [NIU Yun, LIU Xiande, JING Wenmao, et al. Relationship between characteristics of soil and vertical distribution of vegetation on the northern slope of Qilian Mountains[J]. Mountain Research, 2013, **31**(5): 527–533]
- [17] CHEN Longfei, HE Zhibin, DU Jun, et al. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in

- alpine ecosystems of northwestern China[J]. *Catena*, 2016, **137**: 37–43.
- [18] YANG Yuanhe, ANWAR M, FENG Jianmeng, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(2): 131–141.
- [19] 马祥华, 焦菊英, 温仲明, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究[J]. *水土保持研究*, 2005, **12**(1): 17–21. [MA Xianghua, JIAO Juying, WEN Zhongming, et al. The changes of soil physical properties in abandoned land during vegetation restoration in hilly and gully regions on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, **12**(1): 17–21]
- [20] BONDI G, CREAMER R, FERRARI A, et al. Using machine learning to predict soil bulk density on the basis of visual parameters: Tools for in-field and post-field evaluation [J]. *Geoderma*, 2018, **318**: 137–147.
- [21] TRANTER G, MINASNY B, MCBRATNEY A B, et al. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density[J]. *Soil Use and Management*, 2007, **23**(4): 437–443.
- [22] 周李磊, 朱华忠, 钟华平, 等. 新疆伊犁地区草地土壤容重空间格局分析[J]. *草业学报*, 2016, **25**(1): 64–75. [ZHOU Lilei, ZHU Huazhong, ZHONG Huaping, et al. Spatial analysis of soil bulk density in Yili, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. *Acta Prataculturae Sincica*, 2016, **25**(1): 64–75]
- [23] 胡良平. 一般线性模型的几种常见形式及其合理选用[J]. *中国卫生统计*, 1999, **16**(5): 269–272. [HU Liangping. Common patterns and rational applications of the general linear model[J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 1999, **16**(5): 269–272]

Patterns and Environmental Controls of Soil Bulk Density in the Mountainous Regions of the Upper Heihe River Basin, China

ZHANG Mengxu^{1,2}, LIU Wei^{1*}, ZHU Meng^{1,2}, YANG Linshan¹, LI Ruolin¹

(1. Key Laboratory of Eco-hydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The soil bulk density plays an important role in calculating the field capacity, water conductivity, and soil nutrients and carbon stocks. However, the common method used in determining the bulk density is generally laborious, especially in the mountainous regions characterized by complex topography. As a result, the bulk density data for mountainous soils are often missing in the databases. In this study, based on 124 soil profiles, the spatial patterns and environmental controls of bulk density were determined in the mountainous regions of the upper Heihe River basin. Results showed that the bulk density at 0 ~ 10 and 0 ~ 60 cm in the upper Heihe River basin was 0.91 ± 0.02 and $1.04 \pm 0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, respectively. In addition, the bulk density was characterized by the highest and lowest value in the alpine desert and montane forests, respectively. The bulk density increased with increasing soil depth following a power function, while decreased with increasing soil organic matter content following an exponential function. Regionally, bulk density showed a decreasing trend from the northwest to southwest part of the upper Heihe River basin, and was minimum at the mid-elevation zone along the altitude gradient. Among the environmental factors examined, the principle component analysis (PCA) showed that the elevation, soil organic matter content, clay content, and content of gravel larger than 2.0 mm were characterized by the highest loadings on the first, second, third, and forth principal components, respectively. The general linear model (GLM) further demonstrated that the first, second, third and forth principal components explained 24.00%, 29.40%, 0.01% and 6.20% of the total variation in bulk density, respectively.

Key words: soil bulk density; spatial patterns; environmental controls; upper Heihe River basin