

高 琳, 龙怀玉, 陈晓远, 等. 基于中国土壤系统分类土纲的河北省土壤有机碳和氮含量与密度对比分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(3) : 657-665.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.03.011

# 基于中国土壤系统分类土纲的河北省土壤有机碳和氮含量与密度对比分析

高 琳<sup>1,2</sup>, 龙怀玉<sup>3</sup>, 陈晓远<sup>1</sup>, 张登山<sup>2</sup>, 林昌华<sup>1</sup>

(1. 韶关学院英东生物与农业学院, 广东 韶关 512005; 2. 青海省农林科学院, 青海 西宁 810016; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 区域土壤有机碳、氮含量调查在构建全球土壤碳、氮循环的认识中具有重要作用。以河北省实地调查和试验数据为基础, 根据 162 个典型土壤剖面的数据, 分析 1 m 土体中不同土纲的土壤有机碳、氮含量和密度差异及其原因。结果表明, (1) 不同诊断表层、诊断特性土壤的有机碳、氮含量及密度值差异显著 ( $P < 0.05$ ), 有机表层、草毡表层和暗沃表层明显高于其他诊断表层, 具有有机土壤物质诊断特性和均腐殖质诊断特性的土壤有机碳、氮含量高于其他土壤。(2) 不同土纲的土壤有机碳含量和密度均以 0~25.0 cm 土层最高, 呈现出较明显的表聚现象。1 m 土体中, 有机土、均腐土和潜育土有机碳含量和密度均显著高于其他土纲 ( $P < 0.05$ )。(3) 不同土纲的土壤全氮含量和密度随剖面深度的增加而减少, 1 m 土体中, 有机土、均腐土全氮含量和密度均显著高于其他土纲 ( $P < 0.05$ )。(4) 河北省不同土纲 1 m 土体中土壤 C/N 介于 10~20, 有机土、潜育土和均腐土 C/N 较高, 有利于有机碳、氮的累积。河北省不同土纲的土壤有机碳、氮含量、密度和 C/N 存在一定差异, 土纲类型的确定有助于了解土壤有机碳、氮的性质, 为合理利用土壤提供关键的基础数据。

**关键词:** 土壤有机碳; 氮; 中国土壤系统分类; 土纲; 河北省

**中图分类号:** S155.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)03-0657-09

## Comparison of organic carbon and nitrogen contents and densities of major soil orders in Hebei province based on Chinese soil taxonomy

GAO Lin<sup>1,2</sup>, LONG Huai-yu<sup>3</sup>, CHEN Xiao-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Deng-shan<sup>2</sup>, LIN Chang-hua<sup>1</sup>

(1. Henry Fok College of Biology and Agriculture, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China; 2. Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Xining 810016, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Regional soil organic carbon and nitrogen play an important role in the understanding of global soil carbon and nitrogen cycles. Based on the field survey and measured data of 162 typical soil profiles, the differences in soil organic carbon content (SOC), soil organic carbon density (SOCD), total nitrogen content (TN) and nitrogen density (ND) in 1

m soil were analyzed and discussed on the scale of soil order, and their causes were discussed. Results showed that there were significant differences in SOC, SOCD, TN and ND in soils with different diagnostic horizons or characteristics. The SOC, SOCD, TN and ND in which those of the Histic epipedon, Mattic epipedon and Mollic epipedon were significantly higher than those of other diagnostic horizons, and SOC and TN of the soils with diagnostic characteristics of organic soil materials and isohumic prop-

收稿日期: 2021-09-13

基金项目: 国家科技基础性工作专项 (2008FY110600); 广东省青年创新人才项目 (2014KQNCX207); 广东省大学生创新创业训练项目 (S202110576067)

作者简介: 高 琳 (1986-), 女, 满族, 辽宁鞍山人, 博士, 讲师, 主要研究领域为土壤与农业环境生态。(E-mail) lyn19860203@163.com

通讯作者: 龙怀玉, (E-mail) longhuaiyu@caas.cn

erty were higher than those of other soils. *SOC* and *SOCD* under different soil orders were the highest in 0–25.0 cm soil layer, showing obvious surface accumulation phenomenon. In 1 m soil, *SOC* and *SOCD* of Histosols, Gleisols and Isohumosols were significantly higher than those of other soil orders ( $P<0.05$ ). *TN* and *ND* of all soil orders decreased with the increase of profile depth. In 1 m soil, *TN* and *ND* of Histosols and Isohumosols were significantly higher than those of other soil orders ( $P<0.05$ ). *C/N* ratios of 1 m soil of all soil orders in Hebei province ranged from 10 to 20, and *C/N* ratios of Histosols, Gleisols and Isohumosols were higher, which was conducive to the accumulation of organic carbon and nitrogen. The *SOC*, *SOCD*, *TN*, *ND* and *C/N* are different among different soil orders in Hebei, the determination of soil order is helpful to understand the properties of soil organic carbon and nitrogen, and provide key basic data for rational utilization of soil.

**Key words:** soil organic carbon; nitrogen; Chinese soil taxonomy; soil order; Hebei province

土壤有机碳、氮是全球碳、氮储量的重要组成部分,全球约有1 500 Gt 碳、95 Gt 氮储于土壤中<sup>[1]</sup>, 0~100.0 cm 土壤碳储量约是大气碳储量的 2 倍, 0~100.0 cm 土壤氮储量约是植被氮储量的 3 倍<sup>[2]</sup>, 土壤有机碳、氮积累和分解的微小变幅,对全球的碳平衡都将会产生重大影响,进而影响到全球气候变化<sup>[3-4]</sup>。此外,土壤有机碳、氮也与土壤微生物群落、物理化学特性以及农作物产量关系密切,是土壤肥力的重要表征,是全球生物化学系统、土壤-植物系统的基础元素。中国土壤系统分类是以诊断层(诊断表层和表下层)和诊断特性(诊断层性质)为基础,以发生学理论为指导的定量化的分类体系<sup>[5-6]</sup>,系统分类土纲是土壤理化性质等属性信息的重要载体,土壤类型不同,其物理化学性状不同,其生产能力、固碳潜力和氮素供应能力等土壤属性和功能指标也不相同。土壤碳、氮是全球碳平衡、气候变化、土壤生产力以及农作物产量研究中至关重要的属性指标,探究不同土壤类型的有机碳、氮含量、密度分布特征,对研究土壤碳循环、全球碳变化、农业可持续发展具有重要意义。

近 30 年来中国科研工作者们积极开展土壤碳、氮研究,利用全国第二次土壤普查资料,结合不同时期的土壤采样和出版文献等数据<sup>[7]</sup>,通过地面观测和 3S 技术<sup>[8]</sup>,对全国区域<sup>[9-10]</sup>及青海省、广东省、湖北省、甘肃省、安徽省、广西省、贵州省、陕西省和云南省等<sup>[11-19]</sup>不同省域,以及黄土高原<sup>[20]</sup>、青藏高原<sup>[21-23]</sup>等不同流域的土壤有机碳、氮含量和储量进行了大量的研究工作,得到不同流域和省域尺度的土壤有机碳、氮数据。河北省地处黄河以北,是中国北方的农业大省,耕地面积约占全省土地面积的 87.5%。在河北省土壤有机碳、氮的研究中,主要基于 1999 年、2005 年实施全国多目标区域地球化学调查工作的结果,对河北平原土壤有机碳和无机碳

的分布及碳储量进行估算和研究<sup>[24]</sup>。目前在河北省土壤碳库的研究上缺乏系统的实测数据,而诊断层及诊断特性是确定土壤类别的依据,不同土纲的土壤碳、氮含量影响土壤的功能性,了解不同土纲剖面不同层次的有机碳、氮含量的特征是合理利用土壤的关键。然而现在鲜有基于系统分类土纲的河北省土壤有机碳、氮储量研究,不利于提高基于土壤类型的有机碳、氮储量预测的精度和土壤资源的合理利用。因此本研究以河北省中国土壤系统分类的主要土纲为研究对象,以实地调查和室内分析数据为基础,根据全省 162 个土壤剖面土壤有机碳、氮含量的实测数据,计算河北省不同系统分类土纲下土壤剖面有机碳、氮含量和密度,分析不同分类土纲土壤的有机碳、氮含量和密度的差异,以期对土壤碳、氮储量评估提供借鉴,为区域性土地资源的合理利用及对中国土壤碳库贡献量提供基础数据参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河北省地处华北腹地,位于北纬 36°03′~42°40′,东经 113°27′~119°50′,总面积  $1.885 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,东临渤海,南望黄河,西靠太行,北依燕山<sup>[25]</sup>。地势西北高、东南低,由西北向东南倾斜,兼有高原、山地、丘陵、盆地、平原和湖泊等地貌类型,属半干旱、半湿润季风气候区,平均年降水量 350~770 mm。成土母质主要包括残积物、坡积物及黄土母质等;植被类型主要有阔叶林和农作物栽培植被等;在发生分类体系中,土壤类型以褐土、潮土、棕壤为主要土类,地带性土壤为褐土。河北省耕作历史悠久,各类自然土壤已熟化为农业土壤。土地利用类型主要有耕地、林地以及草地等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样点设置与采集 本研究依托国家科技部

启动的国家科技基础性工作专项“中国土系调查与《中国土系志》编制(2008FY110600)”,于2009–2011年在河北省进行野外实地调查和布点,根据土壤发生学理论,充分考虑到成土母质、地形、植被、气候和农业生产等因素,基于1:5.0×10<sup>5</sup>的地质图、1:1.0×10<sup>5</sup>的土地利用图、1:5.0×10<sup>5</sup>的土壤图、1:2.5×10<sup>4</sup>的DEM图和1:2.5×10<sup>4</sup>的行政区划图等基本资料,通过ArcGIS软件空间叠加得到不同地质、土地利用、地形地貌和土壤类型等因素的景观综合体,根据省级尺度下可达性、代表性和均匀性的原则,筛选、调整并确定样点位置,共布设162个土壤剖面点。剖面采集均按《野外土壤描述与采样手册》<sup>[26]</sup>的要求,挖掘长1.5 m、宽1.5 m、深1.0 m的土壤剖面,并记录土壤剖面 and 土壤环境状况,划分发生学层次,获取直径>2 mm的石砾体积含量。按发生学层次由下至上分层取样,每层各取3个重复土样,将每个土壤剖面中同一层次的土壤样品混合均匀,除去土样中的植物体等杂质,按四分法去除多余土样后装入无菌袋带回实验室供室内分析。2011–2013年完成土壤样品和土壤属性指标的测定,2013–2017年依据中国土壤系统分类,确定出有机土(1个样品)、潜育土(4个样品)、人为土(6个样品)、盐成土(9个样品)、均腐土(19个样品)、淋溶土(21个样品)、锥形土(62个样品)和新成土(40个样品)8个土纲。剖面点分布如图1所示。

**1.2.2 样品指标测定与计算** 土壤样品经自然风干、磨碎、过筛后,土壤容质量测定采用环刀法,pH测定采用酸度计法,有机碳含量测定采用浓硫酸-重铬酸钾氧化法,全氮含量测定采用凯氏定氮法<sup>[27]</sup>。本研究将土壤剖面的深度统一为0~100.0 cm,根据剖面厚度加权平均的方法,将土壤剖面数据转化为等间隔深度(0~25.0 cm、25.1~50.0 cm、50.1~75.0 cm和75.1~100.0 cm)剖面的数据。如某一剖面可能为0~15.0 cm、15.1~30.0 cm等,那么0~25.0 cm的有机碳含量为[(0~15.0 cm有机碳含量)×15/25+(15.1~30.0 cm有机碳含量)×5/25],以此类推,计算0~25.0 cm、25.1~50.0 cm、50.1~75.0 cm和75.1~100.0 cm土壤剖面<sup>[28]</sup>的有机碳、氮含量及密度。

土壤有机碳密度(SOCD)、氮密度(ND)分别指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳、氮的储量。两者采用公式如下:

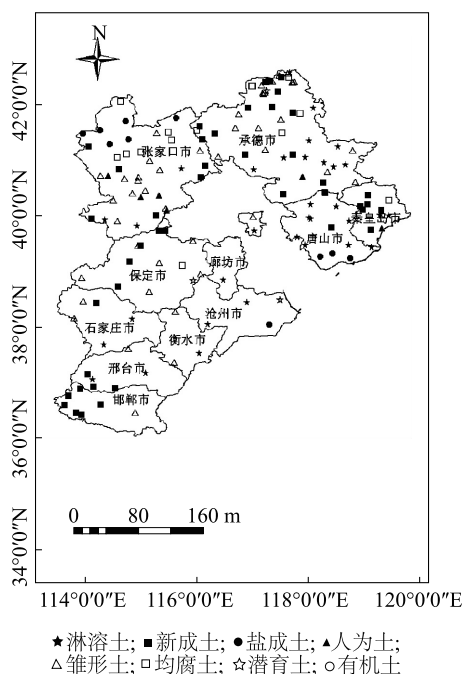


图1 8个土纲162个的典型剖面点的空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of 162 typical soil profiles of eight soil orders

$$SOCD = 0.1 \times SOC_i \times \gamma \times H_i \times \left(1 - \frac{\delta_2}{100}\right)$$

$$ND = 0.1 \times TN_i \times \gamma \times H_i \times \left(1 - \frac{\delta_2}{100}\right)$$

式中,SOCD、ND分别代表土壤有机碳密度、氮密度,kg/m<sup>2</sup>;i代表不同土层层次;SOC、TN分别代表土壤有机碳含量、氮含量(%);γ表示容质量,g/cm<sup>3</sup>;H表示土层的厚度,cm;δ<sub>2</sub>表示土壤中直径>2 mm的石砾含量百分比(%).

### 1.3 数据处理

试验所得数据用Microsoft Access 2016数据库和Microsoft Excel 2016进行整理,利用IBM Statistics SPSS 21.0对不同土纲下土壤有机碳、氮密度进行单因素方差分析,利用ArcGIS10.4制作剖面点的空间分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同诊断层和诊断特性的土壤有机碳、氮特征

《中国土壤系统分类》中划分了11个诊断表层、20个诊断表下层及25个诊断特性<sup>[5]</sup>。河北省8个土纲的诊断表层主要包括暗沃表层、淡薄表层、有机表层、草毡表层、灌淤表层、水耕表层和肥熟表层

等;诊断表下层主要包括雏形层、钙积层、粘化层和漂白层等;诊断特性主要包括有机土壤物质、均腐殖质特性、冷性/温性土壤温度状况、半干润/湿润/潮湿土壤水分情况、氧化还原特征和石灰性等。

表 1 为 162 个样点中不同诊断表层土壤的有机碳、氮含量及密度值,可以看出,有机表层、草毡表层和暗沃表层的 *SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 较高。6 个不同诊断表层土壤的有机碳、氮含量及密度值大小均依次为有机表层>草毡表层>暗沃表层>水耕表层>淡薄表层>灌淤表层,其中,有机表层、草毡表层和暗沃表层的 *SOC* 和 *SOCD* 显著高于其他诊断表层 ( $P<0.05$ ),有机表层和暗沃表层的 *TN* 和 *ND* 显著高于其他诊断表层 ( $P<0.05$ ),而淡薄表层、水耕表层和灌淤表层之间的 *SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 差异不显著 ( $P>0.05$ )。不同诊断表下层土壤的 *SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 差异不显著 ( $P>0.05$ )。不同土壤类型具有的诊断特性不同,土壤的有机碳、氮含量及密度值差异显著。从表 2 可以看出,土体中具有有机土壤物质特性的土壤其 *SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 最高,具有均腐殖质特性的土壤次之,明显高于其他土壤 ( $P<0.05$ ),除了这 2 种诊断特性,含有其他诊断特性的土壤中,*SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表 1 不同诊断层的土壤有机碳、氮含量及密度差异

Table 1 Differences of soil organic carbon content (*SOC*), soil organic carbon density (*SOCD*), total nitrogen content (*TN*) and nitrogen density (*ND*) in different diagnostic horizons

诊断层	<i>SOC</i> (g/kg)	<i>SOCD</i> (kg/m <sup>2</sup> )	<i>TN</i> (g/kg)	<i>ND</i> (kg/m <sup>2</sup> )
有机表层	103.36±36.36a	20.84±3.27a	6.64±2.59a	1.32±0.27a
草毡表层	44.74±0.34b	10.12±0.04b	3.15±0.04b	0.71±0.01b
暗沃表层	26.69±1.67c	8.02±0.05c	2.01±0.11bc	0.61±0.03bc
淡薄表层	12.06±0.76d	3.74±0.19d	1.03±0.05d	0.32±0.01d
水耕表层	12.54±0.98d	4.07±0.28d	1.12±0.07d	0.36±0.02d
灌淤表层	8.72±1.50d	2.84±0.48d	0.89±0.07d	0.29±0.02d

*SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 分别表示有机碳含量、有机碳密度、氮含量和氮密度。同一列数据后不同小写字母表示差异达显著水平 ( $P<0.05$ )。

## 2.2 不同土纲的有机碳含量及其密度的剖面垂直分布特征

从表 3 可以看出,不同土纲 0~100.0 cm 土层中的有机碳存在显著差异,土壤有机碳含量大小依次

为有机土>潜育土>均腐土>新成土>雏形土>盐成土>人为土>淋溶土,其中潜育土 *SOC* 与其他土纲 *SOC* 呈现显著性差异 ( $P<0.05$ ),此外,淋溶土的 *SOC* 显著低于雏形土、新成土和均腐土 ( $P<0.05$ ),均腐土显著高于雏形土、人为土、盐成土和淋溶土 ( $P<0.05$ )。在 0~100.0 cm 深度的垂直分布上,不同土层的有机碳含量存在显著差异 ( $P<0.05$ ),从表层至底层 *SOC* 呈现递减趋势,依次为 0~25.0 cm>25.1~50.0 cm>50.1~75.0 cm>75.1~100.0 cm,其中 0~25.0 cm 土层中土壤 *SOC* 与其他土层 *SOC* 存在显著差异 ( $P<0.05$ ),其他土层之间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表 2 土壤剖面具有不同诊断特性的土壤有机碳、氮含量及密度差异

Table 2 Differences of *SOC*, *SOCD*, *TN* and *ND* in soils with different diagnostic characteristics

诊断特性	<i>SOC</i> (g/kg)	<i>SOCD</i> (kg/m <sup>2</sup> )	<i>TN</i> (g/kg)	<i>ND</i> (kg/m <sup>2</sup> )
有机土壤物质特性	79.52±35.06a	16.32±5.07a	5.17±2.35a	1.06±0.32a
均腐殖质特性	25.84±2.64b	8.16±0.81b	1.93±0.18b	0.61±0.05b
其他	15.16±0.89c	4.52±0.21c	1.24±0.06c	0.38±0.02c

*SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异达显著水平 ( $P<0.05$ )。

具体到土层上,0~25.0 cm 土层中潜育土的土壤 *SOC* 显著高于其他土纲 ( $P<0.05$ )。25.1~50.0 cm 和 50.1~75.0 cm 土层中均腐土与潜育土的土壤 *SOC* 显著高于其他土纲 ( $P<0.05$ ),其他土纲间差异不显著 ( $P>0.05$ )。在 75.1~100.0 cm 土层中各土纲间的土壤 *SOCD* 差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表 4 为不同土纲 0~25.0 cm、25.1~50.0 cm、50.1~75.0 cm 和 75.1~100.0 cm 的 *SOCD* 的计算结果。从表 4 可以看出,不同土纲土壤剖面的有机碳密度差异显著性,土壤 *SOCD* 大小依次为有机土>均腐土>潜育土>雏形土>人为土>淋溶土>盐成土>新成土,其中潜育土和均腐土的 *SOCD* 分别显著高于其他土纲 *SOCD* ( $P<0.05$ ),雏形土的 *SOCD* 显著低于潜育土、均腐土,显著高于新成土 ( $P<0.05$ ),人为土、淋溶土和盐成土的 *SOCD* 差异不显著 ( $P>0.05$ )。在 0~100.0 cm 的垂直分布上,不同土层的有机碳密度在存在显著差异,从表层至底层 *SOCD* 呈现递减趋势,依次为 0~25.0 cm>25.1~50.0 cm>50.1~75.0 cm>75.1~100.0 cm,其中 0~25.0 cm 土层中土壤 *SOCD* 显著高于其他层次土壤 ( $P<$



0.05), 25.1~50.0 cm 土层中土壤 *SOCD* 显著高于 75.1~100.0 cm ( $P<0.05$ )。

具体到土层上, 0~25.0 cm 和 25.1~50.0 cm 土层中潜育土、均腐土土壤 *SOCD* 显著高于其他土纲 ( $P<0.05$ ), 其他土纲间土壤 *SOCD* 差异不显著 ( $P>$

0.05)。50.1~75.0 cm 土层中均腐土的 *SOCD* 均显著高于其他土层 ( $P<0.05$ ), 其他土纲间土壤 *SOCD* 差异不显著 ( $P>0.05$ )。在 75.1~100.0 cm 土层中各土纲间土壤 *SOCD* 差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表 3 不同土纲不同土层的土壤有机碳含量差异

Table 3 Differences of *SOC* in different soil orders and different soil layers

土纲	有机碳含量 (g/kg)				平均值
	0~25.0 cm	25.1~50.0 cm	50.1~75.0 cm	75.1~100.0 cm	
有机土	175.88	55.92	206.98	139.10	144.47
潜育土	56.12±9.21a	20.10±6.09a	—	—	39.41±9.42a
均腐土	20.72±3.17b	18.82±2.49a	14.78±2.51a	6.51±1.78a	16.33±2.06bc
新成土	19.54±1.67b	8.80±2.01bc	—	—	16.07±1.53cd
雏形土	18.13±1.89b	12.04±1.80b	10.09±1.72b	7.45±1.73a	13.01±1.64de
盐成土	12.37±2.27bc	7.39±1.68bc	7.03±2.33bc	3.60±1.46a	8.00±1.42ef
人为土	12.82±2.89bc	7.28±1.37bc	5.84±0.94bc	3.60±0.84a	7.51±0.97ef
淋溶土	11.37±1.06c	7.08±1.14c	5.03±0.50c	5.16±0.68a	7.31±0.63f

不同小写字母表示同一土层不同土壤类型 *SOC* 的差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 4 不同土纲下不同土层的土壤有机碳密度差异

Table 4 Differences of *SOCD* in different soil orders and different soil layers

土纲	有机碳密度 (kg/m <sup>2</sup> )				1 m 土体有机碳密度
	0~25.0 cm	25.1~50.0 cm	50.1~75.0 cm	75.1~100.0 cm	
有机土	27.32	15.50	27.67	28.08	108.58
均腐土	8.47±1.29b	7.69±1.02a	6.05±1.02a	2.67±0.73a	22.96±3.36a
潜育土	15.23±2.03a	6.51±1.80a	—	—	20.34±4.50a
雏形土	5.00±0.41c	3.43±0.42b	2.96±0.42b	2.29±0.43a	12.53±1.34b
人为土	4.20±0.95c	2.55±0.48b	2.08±0.34b	1.30±0.30a	10.08±1.48bc
淋溶土	3.68±0.29c	2.34±0.31b	1.76±0.16b	1.79±0.22a	9.24±0.77bc
盐成土	3.85±0.58c	2.45±0.49b	2.29±0.68b	1.26±0.48a	9.01±1.86bc
新成土	5.32±0.36c	2.72±0.49b	—	—	6.90±0.60c

不同小写字母表示同一土层不同土壤类型 *SOCD* 的差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 不同土纲土壤氮含量及其密度的剖面垂直分布特征

从表 5 可以看出, 不同土纲 0~100.0 cm 土层中土壤氮含量存在显著差异, 土壤 *TN* 大小依次为有机土>潜育土>均腐土>新成土>雏形土>人为土>盐成土>淋溶土。其中, 潜育土土壤氮含量显著高于其他土纲 ( $P<0.05$ ), 均腐土、新成土以外的其他土纲差异显著 ( $P<0.05$ ), 淋溶土与除人为土和盐成土以外的土纲差异显著 ( $P<0.05$ )。在 0~100.0 cm 深度范围内, 随着土壤深度的增加, 土壤 *TN* 逐渐降

低, 不同土层的土壤 *TN* 存在显著差异, 依次为 0~25.0 cm>25.1~50.0 cm>50.1~75.0 cm>75.1~100.0 cm, 其中 0~25.0 cm 与其他土层土壤 *TN* 存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 25.1~50.0 cm 土层 *TN* 与 75.1~100.0 cm 土层呈现显著差异 ( $P<0.05$ )。

具体到土层上, 同一土层不同土纲间土壤 *TN* 差异显著 ( $P<0.05$ )。0~25.0 cm 土层中潜育土土壤 *TN* 显著高于其他土纲 ( $P<0.05$ ), 淋溶土与除人为土和盐成土以外的其他土纲差异显著 ( $P<0.05$ ), 雏形土、均腐土、人为土和新成土间土壤 *TN* 差异不

显著。25.1~50.0 cm 土层中均腐土显著高于除潜育土以外的其他土纲 ( $P<0.05$ ), 其他土纲之间差异不显著 ( $P>0.05$ )。50.1~75.0 cm 土层中均腐土土

壤  $TN$  显著高于其他土纲 ( $P<0.05$ )。75.1~100.0 cm 土层中各土纲间  $TN$  差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表 5 不同土纲下不同土层的土壤氮含量差异

Table 5 Differences of  $TN$  in different soil orders and different soil layers

土纲	氮含量 (g/kg)				平均值
	0~25.0 cm	25.1~50.0 cm	50.1~75.0 cm	75.1~100.0 cm	
有机土	11.76	5.70	10.97	4.61	8.26
潜育土	3.52±0.54a	1.30±0.53ab	—	—	2.38±0.42a
均腐土	1.56±0.21bc	1.39±0.17a	1.09±0.15a	0.55±0.14a	1.24±0.14b
新成土	1.58±0.12b	0.68±0.10b	—	—	1.19±0.11bc
雏形土	1.37±0.13bc	0.92±0.12b	0.71±0.11b	0.55±0.12a	0.97±0.11cd
人为土	1.13±0.14bcd	0.71±0.07b	0.56±0.09b	0.43±0.09a	0.71±0.06cde
盐成土	1.01±0.18cd	0.68±0.13b	0.55±0.16b	0.31±0.09a	0.68±0.11cde
淋溶土	1.00±0.09d	0.66±0.07b	0.49±0.03b	0.51±0.03a	0.67±0.05e

不同小写字母表示同一土层不同土壤类型  $TN$  的差异显著 ( $P<0.05$ )。

从表 6 可以看出, 不同土纲土壤剖面的氮密度存在显著差异, 土壤  $ND$  依次为有机土>均腐土>潜育土>人为土>雏形土>淋溶土>盐成土>新成土。其中, 均腐土土壤  $ND$  显著高于除潜育土以外的其他土纲 ( $P<0.05$ ), 新成土土壤  $ND$  显著低于与除盐成土以外的其他土纲 ( $P<0.05$ ), 雏形土、淋溶土和人为土之间差异不显著 ( $P>0.05$ )。在 0~100.0 cm 深

度范围内, 随着土壤深度的增加, 土壤  $ND$  逐渐降低, 不同土层的土壤  $ND$  存在显著差异, 依次为 0~25.0 cm>25.1~50.0 cm>50.1~75.0 cm>75.1~100.0 cm, 其中 0~25.0 cm 和 25.1~50.0 cm 土层土壤  $ND$  显著高于其他土层 ( $P<0.05$ ), 50.1~75.0 cm 土层与 75.1~100.0 cm 土层土壤  $ND$  差异不显著 ( $P<0.05$ )。

表 6 不同土纲下不同土层的土壤氮密度差异

Table 6 Differences of  $ND$  in different soil orders and different soil layers

土纲	氮密度 (kg/m <sup>2</sup> )				1 m 土体氮密度
	0~25.0 cm	25.1~50.0 cm	50.1~75.0 cm	75.1~100.0 cm	
有机土	1.83	1.58	1.47	0.86	6.21
均腐土	0.64±0.09b	0.57±0.06a	0.45±0.06a	0.22±0.06a	1.72±0.23a
潜育土	0.96±0.11a	0.42±0.16a	—	—	1.36±0.29ab
人为土	0.37±0.05cd	0.25±0.02b	0.20±0.04b	0.15±0.03a	0.96±0.09bc
雏形土	0.38±0.03cd	0.27±0.03b	0.21±0.02b	0.17±0.03a	0.94±0.08bc
淋溶土	0.33±0.03d	0.22±0.02b	0.17±0.01b	0.19±0.01a	0.85±0.05c
盐成土	0.32±0.05cd	0.23±0.03b	0.18±0.05b	0.11±0.03a	0.76±0.14cd
新成土	0.45±0.03c	0.22±0.03b	—	—	0.56±0.03d

不同小写字母表示同一土层不同土壤类型  $ND$  的差异显著 ( $P<0.05$ )。

具体到土层上, 同一土层不同土纲间的土壤  $ND$  差异显著 ( $P<0.05$ )。0~25.0 cm 土层中潜育土和均腐土显著高于其他土纲土壤  $ND$  ( $P<0.05$ ), 淋溶土和新成土土壤  $ND$  的差异显著 ( $P<0.05$ )。25.1~50.0 cm 土层中潜育土显著高于除均腐土以

外的其他土纲土壤  $ND$ 。50.1~75.0 cm 土层中均腐土土壤  $ND$  显著高于其他土纲 ( $P<0.05$ ), 其他土纲间土壤  $ND$  差异不显著 ( $P>0.05$ ), 75.1~100.0 cm 土层中各土纲间土壤  $ND$  差异不显著 ( $P>0.05$ )。

研究区域 0~100.0 cm 土层中, 8 个土纲的土壤

表层(0~25.0 cm)的 *SOCD*、*ND* 最高,均随着土壤深度的增加而逐渐降低。其中,0~25.0 cm 有机土、潜育土和均腐土的 *SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 相对于其他土纲的表层土壤较高,这可能是由于有机土具有有机土壤物质的诊断特性,土壤有机碳、氮含量高;而均腐土具有有机碳含量较高,盐基饱和、结构良好的暗色腐殖质表层和均腐殖质特性,所以有机碳和氮含量较高。

#### 2.4 不同土纲土壤碳氮比特征

河北省各土纲 1 m 土体中的土壤 *C/N* 介于 10~20,均小于 25,说明研究区土壤中有有机质较易转化和分解。各土纲的 *C/N* 从大到小依次为有机土>潜育土>均腐土>雏形土>新成土>盐成土>淋溶土>人为土。其中潜育土土壤 *C/N* 显著高于除均腐土以外的其他土纲( $P<0.05$ )。0~25.0 cm 土层中,潜育土的 *C/N* 最高,其次为有机土和均腐土,潜育土土

壤 *C/N* 显著高于除均腐土以外的其他土纲( $P<0.05$ ),均腐土土壤 *C/N* 与淋溶土呈显著差异( $P<0.05$ )。25.1~50.0 cm 土层中,潜育土 *C/N* 显著高于其他土纲( $P<0.05$ ),其次为均腐土,显著高于淋溶土( $P<0.05$ )。50.1~75.0 cm 和 75.1~100.0 cm 土层中各土纲间土壤 *C/N* 差异不显著( $P>0.05$ )。

在 0~100.0 cm 深度上,各土纲的 *C/N* 随着土壤剖面深度的增加呈现的规律不一,各土层间的 *C/N* 未呈现显著差异。有机土的 *C/N* 在 75.1~100.0 cm 土层中最高,达到 30.16,25.1~50.0 cm 土层中最低,仅为 9.81;均腐土的 *C/N* 在各土层中差异不大;雏形土的 *C/N* 在 75.1~100.0 cm 土层最高,50.1~75.0 cm 土层其次,25.1~50.0 cm 土层最低;盐成土的 *C/N* 0~25.0 cm 最高,25.1~50.0 cm 最低;淋溶土和人为土的 *C/N* 最低值均出现在 75.1~100.0 cm(表 7)。

表 7 不同土纲下不同土层的土壤碳氮比差异

Table 7 Differences of *C/N* in different soil orders and different soil layers

土纲	<i>C/N</i>				平均值
	0~25.0 cm	25.1~50.0 cm	50.1~75.0 cm	75.1~100.0 cm	
有机土	14.96	9.81	18.87	30.16	17.49
潜育土	15.81±1.17a	17.69±5.42a	—	—	15.93±1.55a
均腐土	13.78±0.85ab	13.24±0.46b	12.63±0.74a	12.97±2.21a	13.02±0.38ab
雏形土	12.46±0.39bc	11.71±0.49bc	13.09±0.73a	13.63±1.97a	12.41±0.43bc
盐成土	12.32±0.54bc	10.53±0.64bc	11.85±1.27a	11.25±1.84a	11.63±0.38bcd
新成土	11.98±0.41bc	11.67±0.85bc	—	—	12.00±0.39bcd
淋溶土	11.39±0.42c	10.68±0.64cd	10.52±0.72a	9.88±0.82a	10.88±0.49d
人为土	10.73±1.07bc	9.98±1.11bc	11.00±0.89a	8.86±1.49a	10.44±0.91d

不同小写字母表示同一土层不同土壤类型 *C/N* 的差异性( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

诊断层和诊断特性是中国土壤系统分类的量化依据,诊断层和诊断特性不同其土壤性质特点也不同。由上述分析可知,有机表层、草毡表层和暗沃表层的 *SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 均高于其他诊断层,具有有机土壤物质特性和均腐殖质诊断特性的土壤 *SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 也均高于其他土壤。有机表层属于诊断表层中的有机物质表层类,是具有较高量有机碳的泥炭质有机土壤物质土层,其有机碳含量大于 120 g/kg,暗沃表层属于诊断表层中的腐殖质表层类,有机碳含量大于 6 g/kg<sup>[5]</sup>。草毡表层和

暗沃表层结合后的诊断层有机碳含量高于暗沃表层,因为草毡表层是草甸植被活的与死的根系交织缠绕的草毡状表层,构成土壤有机质的重要部分。而几项诊断特性中,具有有机土壤物质特性的土壤有机碳含量大于 120 g/kg,具有枯枝落叶层时,有机碳含量甚至大于 600 g/kg,而具有均腐殖质特性的土壤有机碳含量至少大于 6 g/kg<sup>[5]</sup>。因此具有有机表层、草毡表层、暗沃表层和有机土壤物质特性、均腐殖质特性的土层有机碳含量较高。

相对来说,有机土和均腐土的 *SOC*、*SOCD*、*TN* 和 *ND* 较高,其次是潜育土。有机土具有有机碳含量较高的有机表层和有机土壤物质特性的诊断层和

诊断特性,均腐土具有暗沃表层和均腐殖质特性,有机土和均腐土的这些诊断层和诊断特性的有机碳含量均较高,而有机碳和氮呈现正相关关系,因此这 2 个土纲的有机氮含量较高。潜育土的土地利用类型主要为沼泽地,以芦苇和草甸植被为主,有利于土壤有机碳的积累。淋溶土和盐成土有机碳、氮含量及密度相对较低,85%的淋溶土样点和 70%的盐成土样点具有发育程度较差的淡色或较薄的淡薄表层,该诊断层的有机碳含量小于 6 g/kg,有机质含量较低。人为土具有明显的熟化成土过程,具有水耕表层和灌淤表层,在人为耕种培肥过程中,耕作层养分和土壤结构得到改善,在土体上部逐步形成人为土壤层次,但是一般耕种土壤,矿化过程加强,有机质较自然土壤降低。新成土是土壤发育程度较低,相对年龄较小的土壤类型,土壤有机碳、氮含量仅次于有机土、均腐土和潜育土,调查中新成土主要发育于残积母质,位于坡中部,土地利用类型以林地和草地为主,而这些成土因素有利于土壤有机碳、氮的积累。但新成土的有机碳、氮密度较低,因为该土纲仅有表土层和母质层,土层深度普遍在 50 cm 左右,土壤厚度小,有机碳、氮密度小。 $C/N$  是土壤有机碳和全氮含量的比值,其大小可反映有机质的分解状况, $C/N$  大有利于土壤有机质的积累, $C/N$  小,有利于有机质的转化和分解<sup>[29-30]</sup>。河北省各土纲 1 m 土体中的土壤的  $C/N$  介于 10~20,均小于 25,说明研究区土壤中的有机质较易转化和分解。相对来说,有机土、潜育土和均腐土的  $C/N$  较高,有利于有机碳、氮的累积。

以诊断层和诊断特性为主的定量分类是当今土壤分类的主流和趋势,其依据土体构型和土壤内部的物理化学性质将有共性的土壤个体进行科学划分,通过土壤类型,可以了解土壤发生过程、地理分布规律、土壤环境特征以及土壤属性和功能指标,进而可以为土壤的合理区划和利用提供依据,因而土壤分类可以说是科学利用土壤的基础,了解不同类型土壤的碳、氮含量特征是合理利用土壤的关键。而土壤类型区分的精细程度影响着使用者对土壤功能性质的理解和合理利用的水平,土纲、亚纲等高级分类单元可以表达土壤的地域特征,诊断层的差异可以表达土壤的属性差异,进而指导土壤利用和农业生产。

## 4 结 论

河北省不同诊断表层和诊断特性的土壤有机碳、氮特征差异明显,具有有机表层、草毡表层和暗沃表层的  $SOC$ 、 $SOCD$ 、 $TN$  和  $ND$  显著高于其他诊断表层 ( $P<0.05$ ),具有有机土壤物质特性和均腐殖质特性的  $SOC$ 、 $SOCD$ 、 $TN$  和  $ND$  显著高于其他诊断特性的土壤 ( $P<0.05$ )。1 m 土壤剖面上,不同土纲的土壤有机碳、氮含量及密度均以 0~25.0 cm 土层最高,呈表聚特征。通过土纲类型,有助于了解土壤有机碳、氮含量与密度等土壤属性和功能特征,诊断层和诊断特性的差异可以表达土壤有机碳、氮的特征差异,有利于指导土壤利用和农业生产。

## 参考文献:

- [1] 周 咪,肖海兵,聂小东,等. 近 30 年国内外土壤有机碳研究进程解析与展望[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 391-400.
- [2] WANG N, LUO J L, JUHASZ ALBERT L, et al. Straw decreased  $N_2O$  emissions from flooded paddy soils via altering denitrifying bacterial community compositions and soil organic carbon fractions [J]. Pubmed, 2020, 96(5): 1-10.
- [3] 王艳丽,字洪标,程瑞希,等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 1-9.
- [4] SINGH S K, SINGH A K, SHARMR B K, et al. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(3): 408-421.
- [5] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类检索 [M]. 3 版. 合肥: 中国科技大学出版社, 2001.
- [6] 陈 林,慈 恩,连茂山,等. 渝东南岩溶区典型土壤的系统分类研究[J]. 土壤, 2019, 51(1): 178-184.
- [7] 赵明松,李德成,张甘霖,等. 1980-2010 年安徽省土壤有机碳密度及储量时空变化分析[J]. 地理研究, 2018, 37(11): 2206-2217.
- [8] 徐 丽,于贵瑞,何念鹏. 1980s-2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2150-2167.
- [9] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [10] 解宪丽,孙 波,周慧珍,等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- [11] 陈 曦. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究[J]. 地理科学, 2014, 34(10): 1247-1253.
- [12] 钟 聪,李小洁,何园燕,等. 广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 478-485.
- [13] 张梦旭,刘 蔚,朱 猛,等. 甘肃河西山地土壤有机碳储量及分布特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 64-72.
- [14] 薄会娟,董晓华,郭梁锋,等. 湖北省土壤有机碳垂直分布及储量估算[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 290-296.



- [15] SHI J, HAI C X, GAO W B, et al. The study on the change of soil carbon reserves in northwestern of Shanxi province in nearly 30 years[J]. *Geographic Science Research*, 2017, 6(3):196-205.
- [17] 罗薇,张会化,陈俊坚,等. 广东省土壤有机碳储量及分布特征[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(9): 1593-1601.
- [17] 赵明松,李德成,王世航. 近30年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 595-605.
- [18] 吕文强,周传艳,闫俊华,等. 贵州省主要森林类型土壤有机碳密度特征及其影响因素[J]. *地球与环境*, 2016, 44(2): 147-153.
- [19] 包承宇,曾和平,张梦妍,等. 云南省土壤有机碳储量估算及空间分布[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 260-266.
- [20] 姚毓菲. 黄土高原小流域侵蚀区和沉积区土壤碳氮分布与矿化特征[D].北京:中国科学院大学,2020.
- [21] 马志良,顾国军,赵文强,等. 青藏高原东缘乔灌交错带地被物和土壤碳氮储量特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 17-23.
- [22] WU X D, FANG H B, ZHAO Y H, et al. A conceptual model of the controlling factors of soil organic carbon and nitrogen densities in a permafrost-affected region on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(7):1705-1717.
- [23] GUAN J H, DENG L, ZHANG J G, et al. Soil organic carbon density and its driving factors in forest ecosystems across a northwestern province in China[J]. *Geoderma*, 2019, 352:1-12.
- [24] 宋泽峰,段亚敏,栾文楼,等. 河北平原表层土壤有机碳和无机碳的分布及碳储量估算[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(5): 97-102.
- [25] 龙怀玉,雷秋良. 中国土系志·河北卷[M]. 北京:科学出版社,2017: 3-22.
- [26] 张甘霖,李德成,勋文聚.野外土壤描述与采样手册[M]. 北京:科学出版社,2017.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [28] 杨黎芳,李贵桐,赵小蓉. 栗钙土不同土地利用方式下有机碳和无机碳剖面分布特征[J]. *生态环境*, 2007, 16(1): 158-162.
- [29] RAJAN G, SUSHIL L, BHARAT S A, et al. Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice-based cropping systems: a review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(1): 1-15.
- [30] TUOHY P, O'SULLIVAN L, FENTON O. Field scale estimates of soil carbon stocks on ten heavy textured farms across Ireland[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 281:111903-111910.

(责任编辑:陈海霞)