环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第45卷 第1期
2024年1月15日

目 次

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征

李子阳[1,2], 陈露[1,2], 赵鹏[2], 周明华[1*], 郑静[1], 朱波[1]
(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 20世纪90年代以来,西南紫色土丘陵区大量坡耕地转变为果园,提高了农民的经济收益,但这一土地利用变化对土壤碳(C)、氮(N)空间分布特征的影响仍然缺乏研究. 为探究紫色土丘陵区坡耕地转变为果园后土壤C、N的空间分布特征,选取四川盆地中部紫色土丘陵区代表性柑橘园为研究对象,分析了由坡耕地转变为柑橘园后,土壤C、N空间分布特征及其主要影响因素. 结果表明,坡面位置(坡位)对土壤总氮(TN)、硝态氮(NO_3^--N)和可溶性有机碳(DOC)含量均有显著影响($P < 0.05$),而对土壤总有机碳(SOC)和铵态氮(NH_4^+-N)的含量没有显著影响($P > 0.05$). 在0 ~ 30 cm土层,土壤NO_3^--N含量沿坡面的变化趋势为:上坡位 < 中坡位 < 下坡位,而TN和DOC含量沿坡面的变化趋势为:上坡位 > 中坡位 > 下坡位. 各坡位土壤C、N含量随深度(0 ~ 30 cm)增加呈现整体降低趋势,其中土层深度对土壤TN、SOC、NO_3^--N和DOC含量的影响显著($P < 0.05$). 坡面土壤TN储量(0 ~ 30 cm)随坡位自上而下逐渐降低($P < 0.05$),其中坡上、坡中和坡下的土壤TN储量分别为2.37、1.89和1.62 t·hm^{-2}(以N计). SOC储量沿坡面的分布差异不显著,变化范围(以C计)为56.12 ~ 58.48 t·hm^{-2},整个坡面土壤TN与SOC的储量呈显著正相关关系. 结果表明,在预测土壤C、N含量及储量对土地利用转变响应时不能忽视土壤养分的空间分布规律,研究可为理解紫色土丘陵区耕地转变为果园后土壤C、N空间分布特征及主控因子提供研究案例.

关键词: 紫色土; 柑橘园; 坡位; 氮(N); 碳(C); 空间分布
中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2024)01-0343-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202302013

Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area

LI Zi-yang[1,2], CHEN Lu[1,2], ZHAO Peng[2], ZHOU Ming-hua[1*], ZHENG Jing[1], ZHU Bo[1]
(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Since the 1990s, a large area of sloping farmland in a purple soil hilly region of southwest China was converted into an orchard to prevent soil erosion, increase soil fertility, and elevate economic benefits for farmers. In order to explore the spatial distribution of soil carbon (C) and nitrogen (N) fractions on the slope of returning arable lands to citrus orchards in purple soil hilly areas, a soil sampling event was carried out in a citrus orchard at the Yanting Agro-ecological Experimental Station of Purple Soil, Chinese Academy of Sciences, to examine the differences in soil C and N fractions and their influencing factors. The results showed that the slope position had significant effects on the contents of soil total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO_3^--N), and dissolved organic carbon (DOC) ($P < 0.05$), but the effects were not obvious regarding the total organic carbon (SOC) and ammonia nitrogen (NH_4^+-N) of the soil ($P > 0.05$). For topsoil (0-30 cm), the variation trend of soil NO_3^--N content along the slope was upper slope < middle slope < lower slope, whereas the TN and DOC contents along the slope exhibited the trend of upper slope > middle slope > lower slope. The contents of soil C and N in each slope position generally showed a downward trend with increasing soil depth (0-30 cm). The contents of soil TN, SOC, NO_3^--N, and DOC were significantly affected by soil depth ($P < 0.05$). The TN storage (0-30 cm) significantly decreased from the top to the bottom within the soil slope, with a value of 2.37, 1.89, and 1.62 t·hm^{-2} (reported as N) for the upper slope, middle slope, and lower slope, respectively. There was no significant difference in SOC reserves along the slope, with a range from 56.12 to 58.48 t·hm^{-2} (reported as C). Our results provide scientific basis for understanding the spatial distribution of soil nutrients of the restored farmland in purple soil hilly areas. Our research suggests that the spatial distribution of soil carbon and nitrogen storage should not be ignored when predicting the response of soil nutrients to land use change.

Key words: purple soil; citrus orchards; slope position; soil nitrogen (N); soil carbon (C); spatial variation

碳(C)、氮(N)是植物生长必需的营养元素,也是土壤养分的重要组成部分[1]. 作为生物圈中最大的陆地C库,土壤的C储存量远远高于植物和大气C储存量的总和,而土壤中约有2/3的C被认为是土壤有机碳(SOC)[2]. SOC可以直接影响土壤肥力和土壤结构,其微小的变化都将会对大气中的二氧化碳(CO_2)浓度产生极大的影响[3]. 而土壤中的N素为生物体的生命元素,通常是陆地生态系统初级生产力的营养限制因子[4],同时还直接影响SOC在土层中的累积速率[5,6]. 土壤C、N的累积受多种因素的影响,如气候条件[7]、地形[8]和土地利用变化[9]等. 其中,土地利用变化会导致植物种类、数量及生物量的改变,植物生理变化又会影响土壤C、N含量动态变化,进而影响土壤C、N的固存[10]. 在过去的几十年里,许多国内外研究在不同尺度上探讨了土地利用变化对土壤C、N

收稿日期: 2023-02-03; **修订日期**: 2023-03-12
基金项目: 国家自然科学基金委区域创新发展联合基金重点支持项目(U22A20562)
作者简介: 李子阳(1996~),男,博士研究生,主要研究方向为土地利用和土壤生态,E-mail:liziyang18@mails.ucas.ac.cn
* 通信作者,E-mail:mhuazhou@imde.ac.cn

含量分布的影响. 例如,雷利国等[11]在重庆缙云山的研究发现,林地转变为耕地后,大大降低了 SOC 含量;Kooch 等[12]在伊朗北部的研究发现,森林向牧场的转变增加了土壤总氮(TN)含量. 在全球气候变化背景下,研究土地利用转变下土壤 C、N 空间分布变化具有重要意义[13~15].

紫色土坡耕地作为川中丘陵地区的主要耕地类型,具有结构差和有机质含量低等特点[16]. 20 世纪 90 年代以来,为提高山区农民的经济效益,大量坡耕地被人工种植果树建成果园[17]. 对于川中丘陵区坡地而言,坡面结构与位置作为该地区的主要地形因子,影响着温度、水分和光照等在坡面的空间分布,从而影响土壤坡面 C、N 累积与分解[18]. 此外,不同坡面位置(坡位)具有不同的土壤侵蚀与泥沙沉积,也显著影响着土壤 C、N 在坡面上的重新分配[19,20]. 目前,关于紫色土丘陵区地形条件对坡地柑橘园土壤 C、N 含量与储量及其空间分布的研究不足.

因此,本研究选取川中丘陵紫色土区种植 13 a 的柑橘园为对象,采用野外调查采样与室内分析相结合的方法,分析了坡地柑橘体系不同坡位土壤 C、N 含量与组分的空间分布特征与影响因素,以期为川中丘陵紫色土地区柑橘园土壤肥力长期可持续管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站附近的万安小流域(E 105°31′, N 31°16′). 该流域位于四川盆地中北部盐亭县大兴回族乡,地处嘉陵江流域和涪江流域的分水岭[21],为典型的川中丘陵沟渠集水区,平均海拔在 400 ~ 600 m 之间. 区内属亚热带季风气候,年均气温为 17.3℃,年均降水量为 826 mm(1981 ~ 2006 年),且 65 %的年降水量集中在 5 ~ 9 月[22]. 本研究的试验土壤被当地称为“紫色土”,是我国川中丘陵地区一种主要的土壤类型[23]. 大部分紫色土区域土层较浅薄,平均土层厚度为 30 ~ 80 cm,保水保肥差,有机质和土壤 TN 含量低[24]. 近 20 年来,川中丘陵地区大面积不适宜耕种的陡坡耕地被人工恢复为森林和果园,而该地区作为石灰性紫色土土地利用转变的一个极具代表性的研究地点,备受关注[25,26].

本研究主要在万安流域选取了一个典型的柑橘园作为试验坡地,坡长为 140 m,坡宽为 45 m,平均坡度夹角 14.5°. 该坡地于 2008 年由农田退耕,并休耕一年,2009 年开始种植柑橘. 农田退耕前由当地村民耕种,至少在过去的 20 年里,施行 7 个月小麦和 4.5 个月玉米的轮作制度. 其中小麦年施氮量为 130 kg·hm^{-2}(以 N 计,下同)、磷肥量为 90 kg·hm^{-2}(以 P 计,下同)和钾肥 36 kg·hm^{-2}(以 K 计,下同),玉米年施氮量为 150 kg·hm^{-2}、磷肥量为 90 kg·hm^{-2} 和钾肥 36 kg·hm^{-2}. 退耕后,种植“爱媛 38 号”果冻橙,种植密度为 1 350 株·hm^{-2}. 每年施肥 3 次,分别是春肥、夏肥以及冬肥,春肥主要施用高氮复合肥(含氮量 26%、含磷量 10% 及含钾量 10%),夏肥主要施用平衡型复合肥(含氮、磷和钾量各 16%),冬肥主要施用普通复合肥(含氮量 18%、含磷量 10% 以及含钾量 10%). 春夏肥每株用量 1 500 g 复合肥,冬肥每株用量 800 g 复合肥. 施用复合肥的同时,每株还配合施用 5 kg 左右有机肥(猪粪发酵,氮磷钾平均总含量 8%). 以上所有信息均为询问当地农民和查阅官方记录获取. 具体试验选点信息见图 1.

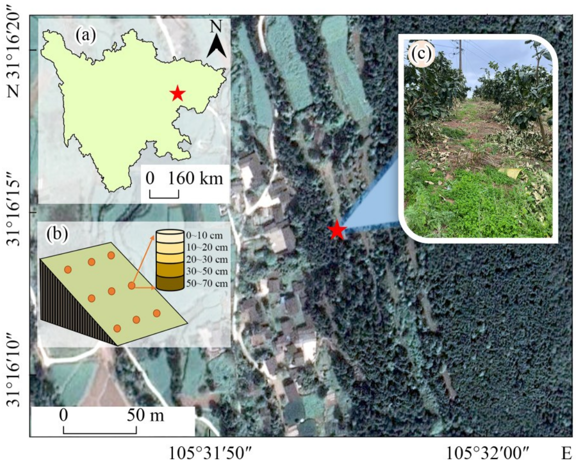


图 1 研究区位置和采样点位示意

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

1.2 样品采集与测定

采样时间为 2022 年 10 月 11 日,根据样地的具体地形,结合 Brubaker 坡面划分原则,将研究坡位分成 3 个部分:坡上、坡中和坡下位置[27]. 在每个坡位随机选取 3 块 2 m × 2 m 的样方,每个样方均去除地表覆盖植被和枯枝落叶层. 由于紫色土壤具有明显的土壤“浅”的特征,坡上和坡中大部分采样点在 30 cm 以下混入了大块石块和母质,而坡下采样点在 70 cm 左右即到达紫色土母岩,所以本研究坡上、坡中和坡下 3 个坡位的采样深度分别为 0 ~ 30、0 ~ 30 和 0 ~ 70 cm. 使用土钻(直径 5 cm)分别采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 50 和 50 ~ 70 cm 土壤样品,每个土层取 3 个样品重复,共得到土壤样品 99 份[3 个坡位 × 3 个地点 × (3 ~ 5) 个土层 × 3 个样品重复],同时采集对应土样的标准环刀样品(环刀容积 100 cm^3). 土壤样品在室温下风干 20 d 以上,研磨后通过 2 mm 筛网测定粒径组成、pH 值、硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N)

和可溶性有机碳(DOC)含量．通过0.25 mm筛网测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全碳(TC)含量[28].

采用105 ℃环刀烘干法测定各垂直土层土壤容重(BD)和土壤含水量(SWC)．利用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000,英国)分析土壤粒径分布(PSD)[29]，利用pH计(Delta 320,中国上海)测定土壤(土∶水 = 1∶5)的pH值[30]．采用连续流动分析仪(AA3,德国SEAL)分析氯化钾浸提液中的NO_3^--N、NH_4^+-N和DOC浓度．土壤TC和TN含量用碳氮分析仪测定(CNS Elementar vario MAX,德国)[31]．采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定SOC的含量[32].

1.3　数据统计与分析

SOC和TN储量(t·hm^{-2},分别以C和N计,下同)计算如下[33]：

$$\text{SOC储量} = \sum \text{SOC}_i \times \text{BD}_i \times D_i \times 0.1$$

$$\text{TN储量} = \sum \text{TN}_i \times \text{BD}_i \times D_i \times 0.1$$

式中,SOC_i和TN_i为第i层采样土壤的SOC和TN含量(g·kg^{-1}),BD_i为第i层采样土壤的容重(g·cm^{-3}),D_i为第i层采样土壤的土层厚度(cm),0.1为单位换算因子.

采用Kolmogorov-Smirnov检验原始数据是否服从正态分布(P = 0.05),采用Levene's检验方差齐性(P > 0.05),所有数据均以平均数±标准差(SD)表示．不同处理之间采用LSD最小显著差数法进行多重比较,显著水平为0.05．采用双因素方差定量分析坡位(因子1)和土层厚度(因子2)及其交互作用对土壤理化性质的影响．使用SPSS Statistics 23.0(SPSS Inc,美国)进行相关性分析和线性回归分析,P < 0.05认为结果具有显著相关性．使用Origin 9.0(Originlab, 美国)生成所有描述参数变化的图表．此外,使用CANOCO 5.0(Micro Power, 美国)软件进行部分冗余分析(RDA)和方差分解分析(VPA),分别计算各因素对土壤TN储量和SOC储量的影响.

2　结果与分析

2.1　紫色土丘陵区柑橘园不同坡位土壤物理参数的空间分布特征

退耕13 a后,不同坡位的柑橘园土壤物理参数分布如表1和表2所示．土壤pH值在8.54 ~ 8.77之间,属于典型的石灰性紫色土．所有坡位0 ~ 30 cm土层,均出现pH值随土壤深度的增加而逐渐增加的现象．其中上坡位和下坡位0 ~ 10 cm土层的pH值均显著低于20 ~ 30 cm土层(P < 0.05)．但是,同一土层厚度的不同坡位间pH值没有显著差异(P > 0.05)．不同坡位剖面土壤BD在0 ~ 10 cm土层最低,为1.15 ~ 1.23 g·cm^{-3},并随土层深度增加而显著增大．下坡位表层土壤(0 ~ 20 cm)BD显著高于中坡位和上坡位土壤．不同坡位最大SWC均出现在0 ~ 10 cm土层(上、中和下坡位分别为:17.04%,15.74%和15.80%),且上坡位土壤的SWC显著低于中、下两坡位．不同坡位的ω(粉粒)均高于50%,ω(黏粒)和ω(沙粒)的变化范围分别为7.74 ~ 16.95 %和20.49 ~ 37.41%,表明该地区土壤质地以黏壤土和粉壤土为主(表2)．如表3所示,双因素方差分析表明坡位和土层厚度显著影响土壤砂、粉、黏粒含量(P < 0.01),且两因素交互作用(坡位 × 土层深度)对上述机械组成因子也有显著影响(P < 0.05)．同样地,坡位和土层厚度也显著影响了土壤BD(P < 0.01),但对土壤pH值和SWC均无显著影响(P > 0.05).

表1　不同坡位土壤pH值、BD和SWC的空间分布特征 1)

Table 1　Spatial distribution characteristics of soil pH, BD, and SWC in different slope positions

土层厚度/cm	pH			BD/Mg·m^{-3}			SWC /%		
	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下
0 ~ 10	8.61±0.10Aa	8.65±0.16Aa	8.54±0.07Aa	1.15±0.02Aa	1.17±0.05Aa	1.23±0.02Ba	12.04±1.64Ab	15.74±2.57Ba	15.80±2.81Bb
10 ~ 20	8.63±0.14Aa	8.71±0.17Aa	8.62±0.17Aab	1.16±0.03Aa	1.19±0.04Aa	1.27±0.02Bab	13.03±0.98Aa	15.30±1.32Ba	15.10±1.41Bab
20 ~ 30	8.71±0.13Ab	8.77±0.17Aa	8.68±0.15Ab	1.23±0.01Ab	1.29±0.03Ab	1.28±0.04Aab	11.40±2.35Aa	15.63±2.25Ba	14.93±2.07Bab
30 ~ 50	—	—	8.71±0.08b	—	—	1.29±0.05b	—	—	12.34±0.51a
50 ~ 70	—	—	8.64±0.23ab	—	—	1.31±0.03b	—	—	14.32±1.22ab

1)不同大写字母表示同一土层不同坡位间差异显著(P < 0.05),不同小写字母表示同一坡位不同土层间的差异显著(P < 0.05);BD和SWC分别表示土壤容重和土壤含水量;"—"表示该土层未取得土样

2.2　紫色土丘陵区柑橘园不同坡位土壤碳、氮养分含量的空间分布特征

如图2所示,3种坡位土壤NH_4^+-N含量在0 ~ 30 cm土层差异较小,其中上坡位0 ~ 10 cm土层ω(NH_4^+-N)最高,为3.29 mg·kg^{-1},并随着土层加深呈现先降低后增加的趋势．中坡位ω(NH_4^+-N)的变化趋势与上坡位相反,呈现先增加后降低的趋势,在10 ~ 20 cm土层达到最高值,为2.44 mg·kg^{-1}．下坡位ω(NH_4^+-N)在0 ~ 30 cm土层的变化趋势与中坡位相同,但在50 cm土层达到最低值1.58 mg·kg^{-1}后,趋势转为增加,在70 cm土层达到下坡位的最高值2.61 mg·kg^{-1}[图2(a)]．上、中两

表 2 不同坡位土壤机械组成的空间分布特征[1)]

Table 2 Spatial distribution characteristics of soil mechanical composition in different slope positions

土层厚度 /cm	ω(砂粒)(2 ~ 0.02 mm)/%			ω(粉粒)(0.002 ~ 0.02 mm)/%			ω(黏粒)(< 0.002 mm)/%		
	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下
0 ~ 10	24.39±1.47Aab	27.67±2.3Aab	26.98±0.56Aa	58.66±3.26Aa	59.53±3.69Aa	58.04±4.04Ab	16.95±1.27Ba	12.80±2.16Ab	14.99±1.15ABab
10 ~ 20	26.60±0.98Ab	23.25±1.36Aa	25.39±1.47Aa	58.01±4.11Aa	68.29±4.24Bb	58.16±4.56Ab	15.39±0.69Ba	8.46±1.67Aa	16.45±1.29Bb
20 ~ 30	20.49±1.23Aa	24.78±2.10Aa	37.41±2.58Bb	62.56±2.09Ba	67.75±2.27Bb	51.65±2.17Aa	16.95±2.01Ca	7.74±0.99Aa	10.94±0.86Ba
30 ~ 50	—	—	29.15±0.87a	—	—	56.79±2.98ab	—	—	14.06±2.12ab
50 ~ 70	—	—	27.74±3.85a	—	—	59.84±3.49b	—	—	11.42±1.39a

1)不同大写字母表示同一土层不同坡位间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一坡位不同土层间的差异显著($P < 0.05$);"—"表示该土层未取得土样

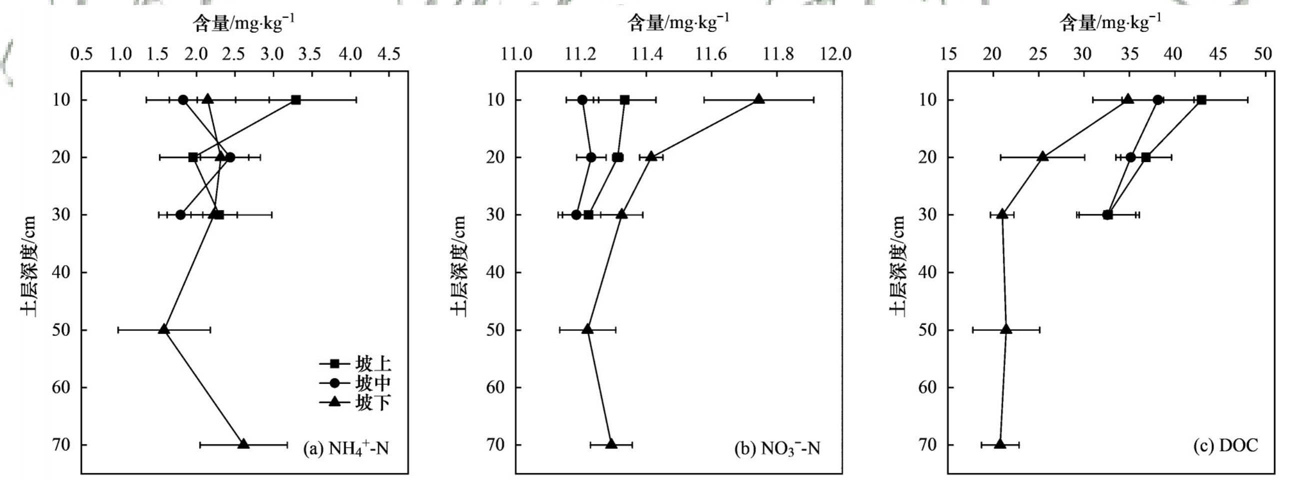
表 3 坡位和土层深度对土壤物理性质影响的双因素方差分析[1)]

Table 3 Two-way analysis of variance to test the effects of slope positions and soil layers on soil physical properties

项目	pH	BD	SWC	砂粒	粉粒	黏粒
坡位	0.400	0.000**	0.043	0.000**	0.000**	0.001**
土层深度	0.574	0.001**	0.205	0.004**	0.000**	0.002**
坡位 × 土层深度	0.918	0.099	0.441	0.000**	0.000**	0.012*

1)*表示显著性水平 $P < 0.05$,**表示极显著性水平 $P < 0.01$

坡位之间 0 ~ 30 cm 土层 NO_3^--N 含量并无显著差异($P < 0.05$),且随土层的变化趋势较小,0 ~ 10 cm 土层 NO_3^--N 含量略高于 20 ~ 30 cm 土层. 下坡位 0 ~ 30 cm 土层 NO_3^--N 含量均高于上、中两坡位,其中 0 ~ 10 cm 土层 $\omega(NO_3^-$-N)在整个坡面最高,为 11.74 mg·kg^{-1},并随着土层深度的加深,先降低后增加[图 2(b)]. 上、中两坡位 0 ~ 30 cm 土层 DOC 含量同样没有显著差异($P < 0.05$),且变化趋势一致,均随着土层加深而降低. 与 NO_3^--N 含量在整个坡面的分布相反,下坡位土壤 DOC 含量均低于上、中两坡位,虽然 ω(DOC)随深度的变化趋势在 0 ~ 30 cm 土层与上、中两坡位一致,但是在 30 cm 土层以下基本保持不变,维持在 20.76 ~ 21.43 mg·kg^{-1}的波动范围内[图 2(c)].



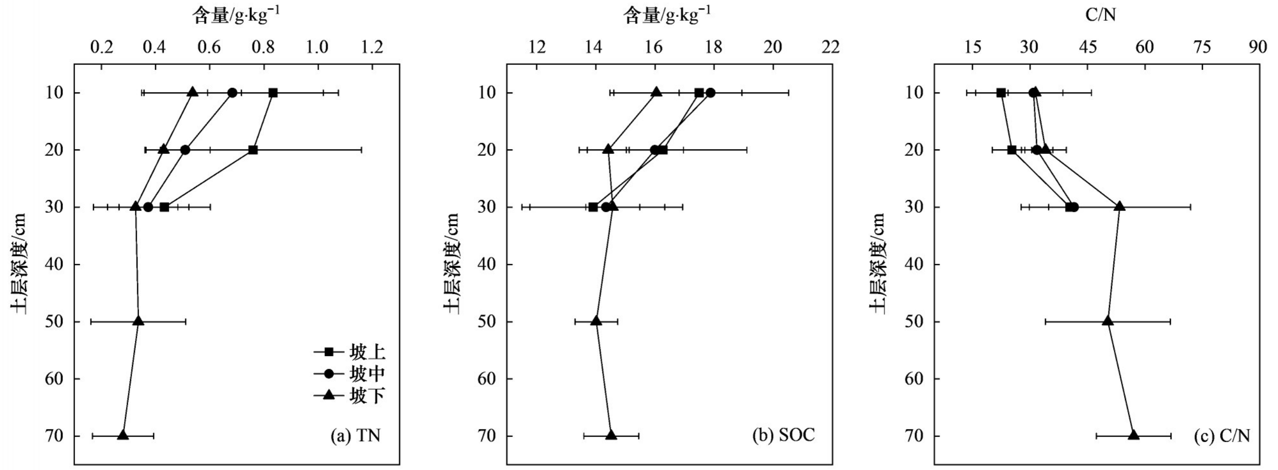
NH_4^+-N、NO_3^--N 和 DOC 分别为土壤铵态氮、硝态氮和可溶性有机碳

图 2 不同坡位土壤 NH_4^+-N, NO_3^--N 和 DOC 含量沿土层的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of NH_4^+-N, NO_3^--N, and DOC contents along soil layers at different slope positions

整体来看,0 ~ 30 cm 土层的不同坡位,土壤 TN 含量分布呈现出上坡位 > 中坡位 > 下坡位的规律. 整个土壤剖面 0 ~ 10 cm 土层 ω(TN)均是最高值,不同坡位的波动范围为 0.54 ~ 0.83 g·kg^{-1},且随着土层加深,土壤 TN 含量呈现出降低的趋势[图 3(a)]. 对于下坡位 30 cm 以下的土层,ω(TN)维持在 0.28 ~ 0.34 g·kg^{-1}的波动范围内,土层间差异并不显著($P >$ 0.05). 上、中两坡位 0 ~ 30 cm 土层 ω(SOC)几乎保持一致,且随着土层深度的加深而降低,变化范围为 13.92 ~ 17.88 g·kg^{-1}. 下坡位 0 ~ 20 cm 土层 ω(SOC)略低于上、中两坡位,但 20 cm 以下的各土层间并无明显差异,基本维持在 14.02 ~ 14.57 g·kg^{-1}的范围内上下波动[图 3(b)]. 土壤 C/N 值同样也是反映应土壤 C、N 养分含量的重要指标. 如图 3(c)所示,0 ~ 20

cm 土层上坡位土壤 C/N 较低，分别为 22.50(0 ~ 10 cm 土层)和 25.29(10 ~ 20 cm 土层). 对于 20 ~ 30 cm 土层，下坡位土壤 C/N 较高，并在 30 cm 以下的土层中呈现先降低后增加的趋势.



TN、SOC 和 C/N 分别为土壤总氮、土壤有机碳和土壤碳氮比

图 3　不同坡位土壤 TN、SOC 和 C/N 沿土层的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of TN and SOC contents, and C/N along soil layers at different slope positions

土壤 TN 和 SOC 储量(0 ~ 30 cm)沿坡向的空间分布如图 4 所示. 整体来看，0 ~ 30 cm 柑橘林土壤剖面 TN 储量随坡面呈自上而下降低的趋势，其中坡上、坡中和坡下的土壤 TN 储量分别为 2.37、1.89 和 1.62 t·hm^{-2}，坡下土壤 TN 储量显著低于坡上($P < 0.05$)，二者相差 0.75 t·hm^{-2}[图 4(a)]. 但同层土壤不同坡位间 TN 储量差异较小，仅仅在 10 ~ 20 cm 土层，坡上土壤 TN 储量显著高于坡下. 同一坡位，随着土层加深，土层 TN 储量呈现降低的趋势. 0 ~ 30 cm 土层 SOC 储量在不同坡位的变化范围在 56.12 ~ 58.48 t·hm^{-2}. 其中，中坡位 SOC 储量最高，但 3 个坡位的差异并不显著($P > 0.05$). 与 TN 储量结果相似，不同坡位 SOC 储量的最大值均出现在 0 ~ 10 cm 土层，分别为 20.13、20.92 和 19.74 t·hm^{-2}(坡上、坡中和坡下). 随着土层加深，SOC 储量呈现微弱降低的趋势，但土层间的差异同样不显著[图 4(b)].

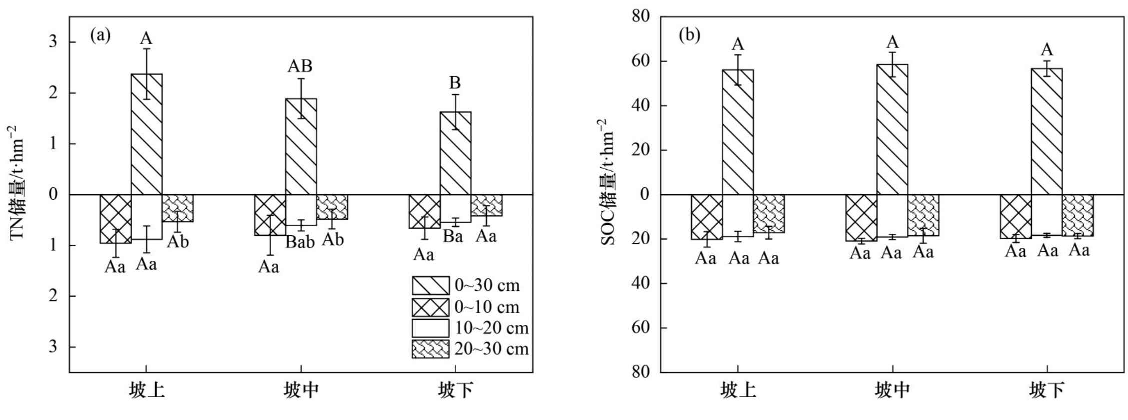


图 4　不同坡位 0 ~ 30 cm 土层 TN 和 SOC 储量的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of TN and SOC storages in 0-30cm soil layer at different slope positions

2.3　不同因素对柑橘园坡地土壤碳、氮变化影响及其贡献

坡位和土层深度对柑橘园坡地土壤 C、N 养分的影响见表 4. 土壤 NO_3^--N、DOC 和 TN 含量受到坡位和土层深度的显著影响($P < 0.05$)，且两因素交互作用(坡位 × 土层深度)对土壤 NO_3^--N 含量也有显著影响($P < 0.05$). 但是土壤 NH_4^+-N 含量与坡位和土层深度之间没有明显的相关关系($P > 0.05$). 此外，土层深度对 SOC 含量影响显著($P < 0.05$)，但 SOC 的含量不受坡位的影响($P > 0.05$). 无论是坡位和土层深度，以及两因素交互作用，均对土壤的 C/N 影响较小($P > 0.05$). 土壤物理参数与土壤 C、N 养分含量的相关矩阵如表 5 所示，在整个柑橘园坡地，土壤 NO_3^--N 含量与土壤 pH 呈极显著负相关关系($P < 0.01$)，其余土壤 C、N 组分含量与土壤 pH 均无显著相关关系($P > 0.05$). 除土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 外，DOC、TN、SOC 含量分别与土壤 C/N 值和 BD 呈极显著负相关关系($P < 0.01$). 其余土壤物理参数与土壤 C、N 组分含

表 4 坡位和土层深度对土壤 C、N 养分含量影响的双因素方差分析[1)]

Table 4 Two-way analysis of variance to test the effects of slope positions and soil layers on soil C and N nutrient contents

项目	TN	SOC	C/N	NH_4^+-N	NO_3^--N	DOC
坡位	0.037*	0.697	0.510	0.394	0.000**	0.003**
土层深度	0.045*	0.042*	0.189	0.468	0.000**	0.011*
坡位 × 土层深度	0.880	0.934	0.986	0.258	0.011*	0.794

1)*表示显著性水平 $P < 0.05$,**表示极显著性水平 $P < 0.01$

表 5 坡面土壤物理性质和 C、N 养分含量的相关矩阵[1)]

Table 5 Correlation matrix of physical properties and C and N nutrient contents of slope soils

	pH	SWC	BD	砂粒	粉粒	黏粒	NH_4^+-N	NO_3^--N	DOC	TN	SOC	C/N
pH	1											
SWC	−0.380	1										
BD	0.161	−0.245	1									
砂粒	−0.117	0.112	0.375	1								
粉粒	0.495	0.077	−0.102	−0.736**	1							
黏粒	−0.558	−0.256	−0.339	−0.241	−0.479	1						
NH_4^+-N	−0.245	0.424	−0.297	−0.203	−0.005	0.269	1					
NO_3^--N	−0.802**	0.305	−0.023	0.113	−0.357	0.367	0.168	1				
DOC	−0.202	0.388	−0.887**	−0.577	0.376	0.209	0.279	0.070	1			
TN	−0.375	0.347	−0.949**	−0.324	−0.006	0.429	0.317	0.117	0.884**	1		
SOC	−0.363	0.592	−0.853**	−0.098	−0.010	0.142	0.289	0.138	0.784**	0.873**	1	
C/N	0.335	−0.373	0.878**	0.538	−0.217	−0.386	−0.249	−0.236	−0.901**	−0.905**	−0.738**	1

1)**表示极显著性水平 $P < 0.01$

量均无明显的相关关系. 此外,为了直观地研究柑橘园坡地土壤 TN 含量与 SOC 含量、TN 储量与 SOC 储量之间的关系,采用线性拟合方法(图 5). 研究结果发现,土壤 TN 含量和 SOC 含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),不同土层的 TN 储量与 SOC 储量也呈显著正相关关系($P < 0.05$),回归斜率分别为 6.6 和 3.8,R^2 分别为 0.76 和 0.41,P 值均小于 0.05,拟合效果较好.

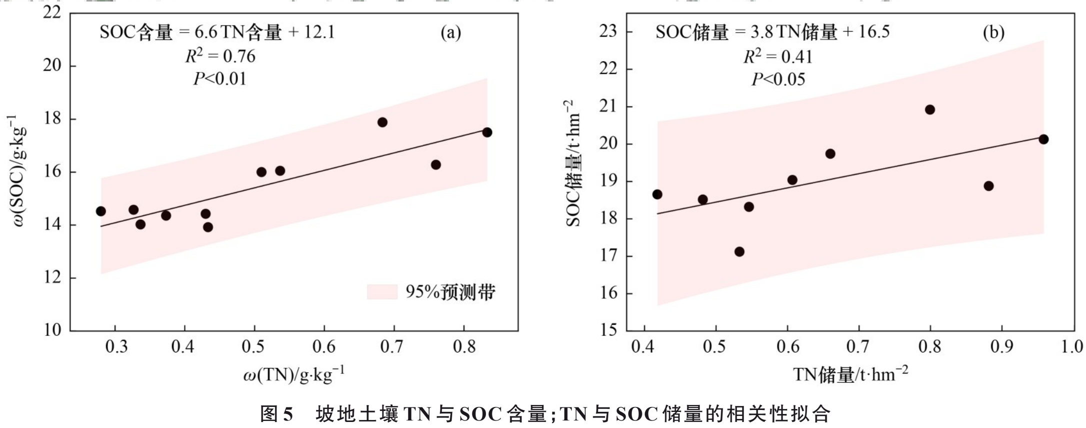
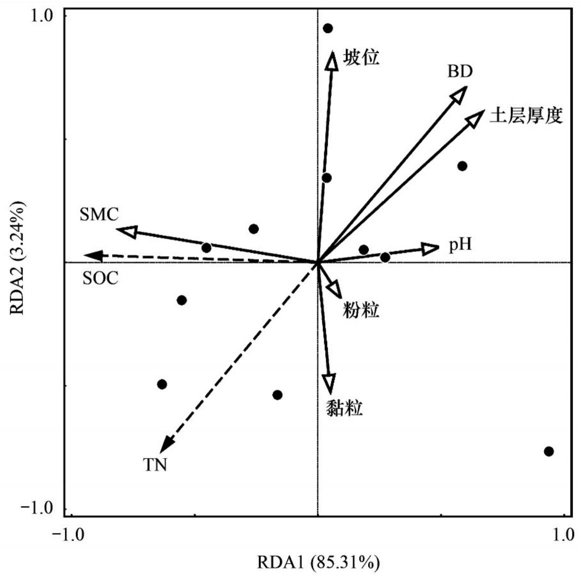


图 5 坡地土壤 TN 与 SOC 含量;TN 与 SOC 储量的相关性拟合

Fig. 5 Relationships between SOC and TN contents, and between SOC and TC storages on the slope

根据各环境变量(坡位、土壤深度及土壤理化因子:BD、SWC、pH、粉粒和黏粒含量)和土壤 TN 和 SOC 含量的 RDA 结果可见(图 6),第一轴土壤 TN 和 SOC 含量与环境因子相关性为 0.94,第二轴土壤 TN 和 SOC 含量与环境相关性为 0.93,排序结果可靠. RDA1 和 RDA2 解释率分别为 85.3%、3.2%,两轴能解释 88.6% 的差异信息. SWC、土层深度和土壤 BD 对 TN 和 SOC 含量变异的解释度分别为 55.6%($P < 0.01$)、39.2%($P < 0.05$)和 32.5%($P < 0.05$),是影响土壤 TN 和 SOC 含量变化 3 个主要的环境因子. 此外,VPA 分析表明(图 7),采样位置(坡位和土层深度)和土壤物理因子(BD、pH、SWC、黏粒和粉粒含量)可以解释土壤 TN 储量 97.6% 的变异[图 7(a)]和 SOC 储量 42.2% 的变异[图 7(b)]. 样地位置和土壤物理因子是影响土壤 TN 储量的主要因素. 它们分别解释了 16.6% ($P = 0.07$)和 4.4% ($P = 0.25$)的变异,2 个因素的交互作用解释了 76.6% 的变异($P < 0.05$). 采样位置对 SOC 储量变化不能提供相应的解

释，但是土壤物理因子可以解释 SOC 储量 15.9%（$P = 0.45$）的变异，且 2 个因素的交互作用解释了 40.6% 的变异（$P < 0.05$）.



虚线箭头表示结果变量，实线箭头表示影响变量

图 6　评估 TN 和 SOC 含量与影响变量之间关系的冗余分析（RDA）

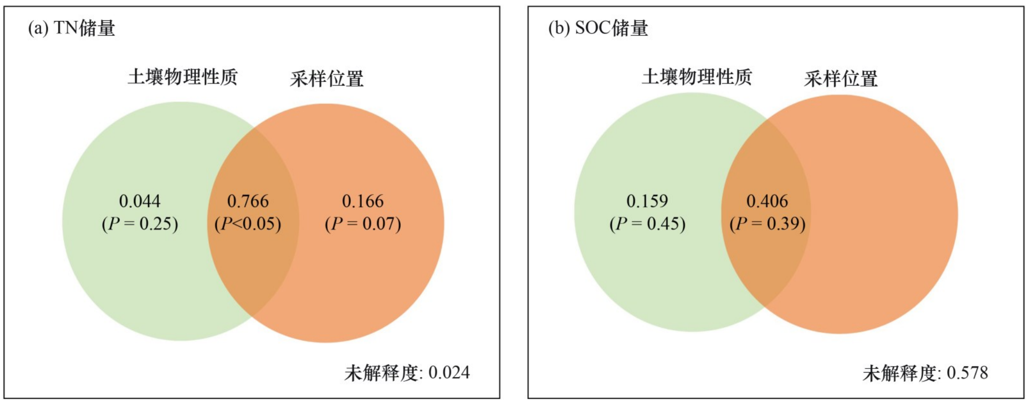
Fig. 6　Redundancy analysis (RDA) assessing the relationships of TN and SOC contents with influential variables

3　讨论

3.1　影响紫色土丘陵区柑橘园土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 和 DOC 含量变化的主要因素

一般来说，不同坡位的土层厚度、通风条件和光照辐射[34]均具有较大的差异，这些条件会影响植被长势，土壤微生物的活性以及凋落物的分解程度[35]，从而共同决定了坡地土壤养分含量的差异以及分布的空间异质性[36]. 本研究发现，坡位显著影响紫色土柑橘园剖面土壤物理参数和 C、N 养分分布，且坡位对不同土壤参数的影响差异较大（表 3 和表 4）. 土壤 NO_3^--N 含量在坡面的分布表现为：下坡位 > 中坡位 > 上坡位［图 2(b)］，这与 Zhang 等[28]在黄土高原丘陵区的研究结果类似；而土壤 NH_4^+-N 含量在不同坡面上的分布差异较小［图 2(a)］. 造成这一现象的主要原因为土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 主要来源于肥料并以水溶性状态存在于土壤中[37]，而川中丘陵地区降雨较多，在地表径流输送的分离作用下，NO_3^--N 向下坡方向输移和再分布[38, 39]，从而导致下坡位土壤 NO_3^--N 含量显著高于上坡位. 同时，土壤 NH_4^+-N 作为不稳定且易被植物直接吸收利用的养分，虽然容易随水分流动到下坡位，但能快速被植物吸收，且容易在转运过程中转化为 NO_3^--N，所以坡位间 NH_4^+-N 差异不大[40]. 土壤 DOC 含量在坡面的分布与 NO_3^--N 含量则相反，表现为：下坡位 < 中坡位 < 上坡位［图 2(c)］. 这一结果与王艳丹等[41]在云南玉溪的人工酸枣林的研究结果相似，均为上坡位土壤 DOC 含量显著高于下坡位. 已有研究证明，上坡位的果树根系更为发达，物质周转速度更快，可为土壤 DOC 提供丰富的基质来源[42]. 但是徐曼等[20]对紫色土旱地坡面的研究则发现下坡位土壤 DOC 含量更高，分析其原因可能是未作阻控措施的坡耕地极易发生水土流失，将上层和中层的 DOC 带到下层重新分布[43]，而果树林土壤表层分布着丰富的植被根系和枯落物，这会极大地影响地表径流的形成和流速，阻止土壤 DOC 向坡面下部迁移和积累[44]. 本研究表明速效 C、N 养分在坡面上的分布是不同坡位多重因素综合作用的结果.

此外，本研究还发现，0 ~ 30 cm 土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 和 DOC 含量随土壤深度的变化趋势各异，但是整体呈现出随土层加深波动下降的趋势（图 2）. 这与汝海丽等[45]对黄土高原坡地的研究结果一致. 除坡形和坡位外，影响养分在土壤剖面垂直分布的主要因素是径流强度、与土壤入渗能力相关的土壤结构、土壤溶液中各养分的吸附能力以及植物对养分的吸收和利用[46, 47]. 土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 和 DOC 均



土壤物理性质包括：pH，容重，土壤含水量，黏粒含量，粉粒含量；采样位置包括：坡位和土层深度；数字表示每个解释变量所解释的方差的比例

图 7　基于方差分解分析（VPA）的土壤物理性质和采样位置对土壤 TN 和 SOC 储量的影响

Fig. 7　Effects of soil physical properties and sampling positions on TN and SOC storages based on variation partitioning analysis (VPA)

属于土壤C和N的速效养分,易溶于水且容易被植物吸收利用. 随自然降雨入渗到下层后,被大量果树的根系生长消耗,从而造成下层土壤C和N的速效养分低于上层的现象[40]. 而柑橘园下坡位拥有更深的土层,土壤NO_3^--N和NH_4^+-N含量在50 cm土层往下出现含量升高的趋势,侧面证明了更深层土壤在没有植物利用的情况下,会出现速效N素累积的现象.

3.2 影响紫色土丘陵区柑橘园土壤TN含量、SOC含量和土壤C/N变化的主要因素

土壤TN和SOC的含量不仅是体现土壤肥力的直接指标,还可以指示土壤C、N养分矿化输入和损失平衡的结果. 与速效C、N养分变化相似,柑橘园土壤TN和SOC含量在坡面的分布也会受到上述多种因素的共同影响. 一般研究认为,在土壤侵蚀或雨水冲刷作用下,坡位由上至下TN和SOC含量会逐渐增加[48, 49]. 而本研究发现,土壤TN含量在坡面的分布表现为:上坡位 > 中坡位 > 下坡位[图3(a)],且受到坡位的显著影响(表4). 虽然SOC含量在坡面上的分布不受空间位置的影响,表现为不同坡位间差异不显著,但下坡位0 ~ 20 cm土层SOC含量仍略低于上、中两坡位,此处借助RDA分析来解释上述结果产生的原因. 在众多土壤物理因素中,SWC和BD是影响坡面土壤TN和SOC的含量分布的关键因素(图6),其中TN和SOC含量与BD均呈显著负相关关系(表5). 前人研究表明,坡面土壤随着BD增大,产流时间提前,径流系数增大,入渗率减小,泥沙侵蚀和养分流失严重[50]. 研究区域内0 ~ 20 cm土层,上坡位BD显著低于下坡位(表1),可合理推测下坡位的土壤侵蚀更严重,从而造成果园下坡位TN和SOC含量会明显减少. 另有前人研究发现,林地坡面枯枝落叶的分解系数(枯枝落叶量/枯枝落叶层)由坡下到坡上逐渐减小,分解率明显降低[41]. 柑橘园上坡位土壤含水量显著低于中坡位和下坡位(表1),水分丧失较快无法为微生物分解提供足够的水分,土壤微生物对有机C、N的分解速率低,导致上坡位TN和SOC的含量要高于下坡位. 同时,下坡位地势较平,靠近路基村道,人为活动更加频繁,翻耕土壤使土壤有机C、N分解速度更快,积累困难[51]. 土壤C/N是土壤质量变化的重要指标,其大小会影响植物的养分利用效率,对生态系统中C、N循环过程起着决定作用[52]. 柑橘园坡地的C/N表现出下坡位高于上坡位,中坡位在二者间徘徊的现象,这与TN和SOC沿坡面的分布相反. 谢柠桦等[53]在紫色土植烟坡地也发现了同土层中土壤C/N变化规律与土壤C、N基本相反的现象,表明整个坡面上TN和SOC积累并非同步,土壤TN和SOC因坡位和土壤物理性质以及微生物的差异而发生变化,最终导致土壤C/N在不同坡位呈现出一定的差异性.

柑橘园土壤剖面TN和SOC含量分布具有明显的表聚性,并在0 ~ 30 cm土层呈现随土层深度的加深,含量均在降低的现象. 双因素方差分析表明,土壤TN和SOC含量均受到土层深度的显著影响,同时RDA分析进一步证明,土层深度对土壤TN和SOC含量变异解释度高达39.2%,仅次于SWC的解释度. 刘延坤等[54]对长白山人工林的研究也得到了类似的结果. 这是因为,土壤表层累积了大量的枯枝落叶和腐殖质,加上光、水、热和通气状况等良好,为微生物和土壤动物生长提供良好环境,加速了地表凋落物分解为土壤有机C、N,并且富集在土层表面[55]. 之后随水分或其他介质向土壤下层迁移扩散,形成土壤C、N含量从表层向下层逐渐降低的分布格局[56]. 整体来看,整个坡面的C/N不受土层深度的影响(表4),这与梁珂等[57]在重庆三峡紫色土区的研究结果一致,进一步证明了紫色土坡耕地退耕后土壤C/N仍然相对稳定的结论.

3.3 土地利用方式转变后紫色土坡地土壤TN和SOC储量变化的主要影响因素

目前已有大量研究表明,植被恢复导致的生物量增加会影响土壤C、N的积累[58],而牧场或林地的开垦会使土壤物理性质退化,从而造成更多的土壤C、N损失[59]. 本研究表明,紫色土坡耕地转变为柑橘园13 a后,坡上、坡中和坡下的土壤TN储量(0 ~ 30 cm)分别为2.37、1.89和1.62 t·hm^{-2},坡面TN储量呈现出自上而下显著降低的趋势[图4(a)];SOC储量沿坡面的分布差异不显著,变化范围在56.12 ~ 58.48 t·hm^{-2}[图4(b)]. 由于储量是根据含量计算而来,因此土壤储量的变化趋势与导致原因和土壤含量基本一致,此处不加赘述. 值得注意的是,本研究只探讨了0 ~ 30 cm土层的土壤TN和SOC的储量,原因是上、中两坡位的土层厚度只有30 cm,如果计算整个土层的总储量,下坡位土壤TN和SOC的储量是最高的. 基于回归分析,土壤TN和SOC的含量及储量均呈现高度正相关关系(图5),说明土地利用转变过程中存在较强的土壤C、N相互作用[60],熊杏等[61]在南方红壤以及张春华等[62]在东北黑土的研究均得出了相同的结论. 分析认为,出现上述结果的原因是由于土壤中大部分氮素和碳素均以有机状态存在于土壤有机质中,其动态变化均受土壤有机质分解的影响[63],导致TN和SOC储量在坡面的高低分布也呈现出相同的趋势. VPA分析结果表明,柑橘园坡面土壤TN和SOC储量受到坡位、土层深度和土壤物理性质的影响,且这3个因素的共同影响对土壤TN和SOC储量变异的解释度最大(图7). 因此,坡耕地转变为

柑橘园后会通过影响土壤C、N的输入和输出平衡，以及改变土壤结构来影响土壤C、N储量[64]. 此外，微生物在土壤的生物地球化学循环和生态系统功能中发挥着重要作用[65]. 未来在研究土地利用方式对紫色土丘陵生态系统不同地形条件和不同恢复年限植被恢复后土壤-植物系统碳、氮的动态变化的影响机制时，还应综合考虑土壤微生物的相关特性.

4 结论

(1)紫色土丘陵区柑橘园坡面土壤不同C、N组分在空间上的分布具有较大差异，并受到坡位和土层深度的显著影响. 其中，土壤NO_3^--N含量从上坡到下坡逐渐增加，TN和DOC含量从上坡到下坡逐渐降低，NH_4^+-N和SOC含量在坡面上的分布没有显著差异. 各坡位表层土壤的C和N养分含量均大于底层(NH_4^+-N含量除外).

(2)土壤物理性质也会显著影响坡面土壤C、N养分含量. 其中，土壤NO_3^--N含量与土壤pH呈极显著负相关关系，除土壤NO_3^--N含量和NH_4^+-N含量外，DOC含量、TN含量、SOC含量和土壤C/N与土壤BD呈极显著负相关关系.

(3)整体来看，紫色土柑橘园坡地土壤TN储量(0 ~ 30 cm)沿坡面的变化趋势为：上坡位 > 中坡位 > 下坡位，且上坡位土壤TN储量显著高于下坡位，而SOC储量沿坡面的分布差异不显著，整个坡面TN与SOC的储量呈显著正相关关系. 综上所述，土壤TN和SOC储量受到坡位、土层深度和土壤物理性质的共同影响. 因此，紫色土丘陵区坡耕地向果园的转变应重视土地利用类型及其转变后土壤C、N在坡面的迁移与重新分配规律，并据此优化养分管理措施，有效提升资源利用效率和减少农业面源污染问题.

参考文献：

[1] Wei X R, Shao M, Fu X L, *et al*. The effects of land use on soil N mineralization during the growing season on the northern Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2011, **160**(3-4): 590-598.

[2] Scharlemann J P W, Tanner E V J, Hiederer R, *et al*. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. Carbon Management, 2014, **5**(1): 81-91.

[3] Wang T, Kang F F, Cheng X Q, *et al*. Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China[J]. CATENA, 2017, **155**: 41-52.

[4] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. Ecology, 2008, **89**(2): 371-379.

[5] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, **10**(2): 423-436.

[6] Fu X L, Shao M, Wei X R, *et al*. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2010, **155**(1-2): 31-35.

[7] Han X Y, Gao G Y, Chang R Y, *et al*. Changes in soil organic and inorganic carbon stocks in deep profiles following cropland abandonment along a precipitation gradient across the Loess Plateau of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, **258**: 1-13.

[8] Fernández-Romero M L, Lozano-García B, Parras-Alcántara L. Topography and land use change effects on the soil organic carbon stock of forest soils in Mediterranean natural areas[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **195**: 1-9.

[9] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2011, **17**(4): 1658-1670.

[10] Gao G Y, Tuo D F, Han X Y, *et al*. Effects of land-use patterns on soil carbon and nitrogen variations along revegetated hillslopes in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2020, 746, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141156.

[11] 雷利国，江长胜，郝庆菊. 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响[J]. 环境科学，2015, **36**(7): 2669-2677.
Lei L G, Jiang C S, Hao Q J. Impacts of land use changes on soil light fraction and particulate organic carbon and nitrogen in Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2669-2677.

[12] Kooch Y, Ghorbanzadeh N, Haghverdi K, *et al*. Soil quality cannot be improved after thirty years of land use change from forest to rangeland[J]. Science of the Total Environment, 2023, 856, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159132.

[13] Meena V S, Mondal T, Pandey B M, *et al*. Land use changes: strategies to improve soil carbon and nitrogen storage pattern in the mid-Himalaya ecosystem, India[J]. Geoderma, 2018, **321**: 69-78.

[14] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis[J]. Global Change Biology, 2014, **20**(11): 3544-3556.

[15] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, **8**(4): 345-360.

[16] 苏正安，熊东红，张建辉，等. 紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J]. 中国水土保持，2018, (2): 42-47.

[17] Chen Z J, Wang L, Wei A S, *et al*. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment[J]. Science of the Total Environment, 2019, **648**: 1097-1104.

[18] Gong X, Brueck H, Giese K M, *et al*. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, **72**(4): 483-493.

[19] 孙文义，郭胜利，宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响[J]. 自然资源学报，2010, **25**(3): 443-453.
Sun W Y, Guo S L, Song X Y. Effects of topographies and land use on spatial distribution of surface soil organic carbon in Hilly Region of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2010, **25**(3): 443-453.

[20] 徐曼，余泺，王富华，等. 紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应[J]. 环境科学，2021, **42**(11): 5491-5499.
Xu M, Yu L, Wang F H, *et al*. Response of soil organic carbon content in different slope positions to fertilization management in purple soil sloping fields[J]. Environmental Science, 2021, **42**

(11): 5491-5499.

[21] 马胜兰, 况福虹, 唐家良, 等. 种植模式对川中丘陵石灰性紫色土结构和地力的影响[J]. 土壤学报, 2021, **58**(4): 935-947.
Ma S L, Kuang F H, Tang J L, *et al*. Effects of planting patterns on soil structure and fertility of calcareous purple soil in hilly areas of central Sichuan basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(4): 935-947.

[22] Zhao P, Tang X Y, Zhao P, *et al*. Mixing of event and pre-event water in a shallow Entisol in sloping farmland based on isotopic and hydrometric measurements, SW China [J]. Hydrological Processes, 2016, **30**(19): 3478-3493.

[23] Zhu B, Wang T, You X, *et al*. Nutrient release from weathering of purplish rocks in the Sichuan Basin, China [J]. Pedosphere, 2008, **18**(2): 257-264.

[24] Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al*. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the central Sichuan Basin, China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, **73**(4): 1419-1426.

[25] Li Z Y, Sun X T, Huang Z H, *et al*. Changes in nutrient balance, environmental effects, and green development after returning farmland to forests: a case study in Ningxia, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 735, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139370.

[26] 柯韵, 杨红薇, 王小国, 等. 紫色土坡耕地退耕还林对土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(7): 1398-1406.
Ke Y, Yang H W, Wang X G, *et al*. Effect of returning cropland to forestland on N_2O emissions from sloping purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(7): 1398-1406.

[27] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, *et al*. Soil properties associated with landscape position [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, **57**(1): 235-239.

[28] Zhang Q Y, Wang Z, Yao Y F, *et al*. Effects of slope morphology and position on soil nutrients after deforestation in the hilly loess region of China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 321, doi: 10.1016/j.agee.2021.107615.

[29] Qi Y L, Wei W, Li J R, *et al*. Effects of terracing on root distribution of *Pinus tabulaeformis* Carr. forest and soil properties in the Loess Plateau of China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 721, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137506.

[30] Zhang J, Wang X J, Wang J P. Impact of land use change on profile distributions of soil organic carbon fractions in the Yanqi Basin[J]. CATENA, 2014, **115**: 79-84.

[31] Valjavec M B, Čarni A, Žlindra D, *et al*. Soil organic carbon stock capacity in karst dolines under different land uses[J]. CATENA, 2022, 218, doi: 10.1016/j.catena.2022.106548.

[32] Liu X, Ma J, Ma Z W, *et al*. Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China[J]. CATENA, 2017, **150**: 146-153.

[33] Deng L, Wang K B, Chen M L, *et al*. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013, **110**: 1-7.

[34] 罗永清, 丁杰萍, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地半固定沙丘不同坡位土壤C,N特征[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(2): 94-100.
Luo Y Q, Ding J P, Zhao X Y, *et al*. Soil carbon and nitrogen characteristics of different positions of semi-fixed dune in Horqin Sandy Land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, **35**(2): 94-100.

[35] 秦华军, 何丙辉, 赵旋池, 等. 西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3580-3586.
Qin H J, He B H, Zhao X C, *et al*. Influence of different slope position and profile in Disporopsis Pernyi forest land on soil microbial biomass and enzyme activity in southwest Karst Mountain of China[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3580-3586.

[36] Zhang Y, Wei L Y, Wei X R, *et al*. Long-term afforestation significantly improves the fertility of abandoned farmland along a soil clay gradient on the Chinese Loess Plateau [J]. Land Degradation & Development, 2019, **29**(10): 3521-3534.

[37] 贾晓红, 李新荣, 肖洪浪. 沙坡头地区农田灌溉和施肥对氮淋溶量影响的研究[J]. 中国沙漠, 2005, **25**(2): 223-227.
Jia X H, Li X R, Xiao H L. Effect of irrigation and fertilization on nitrogen leach loss in field of Arid Shapotou Area[J]. Journal of Desert Research, 2005, **25**(2): 223-227.

[38] Wang L, Shi Z H, Wang J, *et al*. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2014, **512**: 168-176.

[39] Pieri L, Bittelli M, Hanuskova M, *et al*. Characteristics of eroded sediments from soil under wheat and maize in the North Italian Apennines[J]. Geoderma, 2009, **154**(1-2): 20-29.

[40] 刘银, 何露露, 强薇, 等. 经营模式对大渡河干暖河谷黄果柑坡地果园土壤养分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(2): 271-279.
Liu Y, He L L, Qiang W, *et al*. Effects of management modes on soil nutrients in sloping Huangguogan orchards in the dry-warm valley of the Dadu River[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2021, **27**(2): 271-279.

[41] 王艳丹, 何光熊, 宋子波, 等. 酸角人工林不同坡位土壤有机碳及其活性组分的变化[J]. 土壤, 2020, **52**(6): 1256-1262.
Wang Y D, He G X, Song Z B, *et al*. Study on soil organic carbon and its active fractions at different slope sites of *Tamarindus indica* plantation[J]. Soils, 2020, **52**(6): 1256-1262.

[42] Zhou G Y, Zhou X H, He Y H, *et al*. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2017, **23**(3): 1167-1179.

[43] 雷金银, 雷晓婷, 周丽娜, 等. 耕作措施对缓坡耕地土壤养分分布及肥料利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(18): 127-134.
Lei J Y, Lei X T, Zhou L N, *et al*. Effects of tillage measures on soil nutrients distribution and fertilizer use efficiency on gentle slope farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(18): 127-134.

[44] De Baets S, Poesen J, Knapen A, *et al*. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, **32**(9): 1323-1345.

[45] 汝海丽, 张海东, 焦峰, 等. 黄土丘陵区微地形梯度下草地群落植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 自然资源学报, 2016, **31**(10): 1752-1763.
Ru H L, Zhang H D, Jiao F, *et al*. Plant and soil C, N, P stoichiometric characteristics in relation to micro-topography in the Hilly Loess Plateau region, China [J]. Journal of Natural Resources, 2016, **31**(10): 1752-1763.

[46] Yuan Y, Zhao Z Q, Niu S Y, *et al*. Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: a case

study from *Robinia pseudoacacia* reclaimed forests, Pingshuo mine, China[J]. Catena, 2018, **165**: 72-79.

[47] Huang Y M, Liu D, An S S. Effects of slope aspect on soil nitrogen and microbial properties in the Chinese Loess region[J]. Catena, 2015, **125**: 135-145.

[48] 周志文，潘剑君，居为民，等．神农架不同坡位3种林型土壤碳氮比分布特征[J]．水土保持学报，2014，**28**(4)：210-217.
Zhou Z W, Pan J J, Ju W M, *et al*. Distribution of soil C∶N ratio in three forest types on different slope positions in Mt. Shennongjia, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(4): 210-217.

[49] 李龙，姚云峰，秦富仓．内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素[J]．生态学杂志，2014，**33**(11)：2930-2935.
Li L, Yao Y F, Qin F C. Distribution and affecting factors of soil organic carbon of terraced fields in Chifeng, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(11): 2930-2935.

[50] 沈奕彤，郭成久，金珊，等．土壤容重对黑土坡面养分流失的影响[J]．水土保持学报，2016，**30**(1)：26-30.
Shen Y T, Guo C J, Jin S, *et al*. Effect of soil bulk density on nutrient loss of black soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(1): 26-30.

[51] 张欣，梁敬，于铄，等．清水河流域山区坡面土壤养分分布特征[J]．河北农业大学学报，2017，**40**(6)：27-32，38.
Zhang X, Liang J, Yu S, *et al*. Analysis of the distribution characteristics of soil nutrients of mountain slope in Qingshui river watershed[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, **40**(6): 27-32, 38.

[52] 杜满义，范少辉，漆良华，等．不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系[J]．水土保持学报，2010，**24**(4)：198-202.
Du M Y, Fan S H, Qi L H, *et al*. Characteristics and coupling relationship of soil organic carbon and total nitrogen in different types of *Phyllostachys pubescens* stands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(4): 198-202.

[53] 谢柠杩，王棋，李冰，等．坡度和坡位对植烟坡地紫色土有机碳氮变化的影响[J]．长江流域资源与环境，2021，**30**(9)：2245-2252.
Xie N Y, Wang Q, Li B, *et al*. Effects of gradients and positions on organic carbon and nitrogen of purple soil on tobacco planting slope[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(9): 2245-2252.

[54] 刘延坤，李云红，陈瑶，等．坡位对不同密度长白落叶松人工林生态系统碳储量的影响[J]．贵州农业科学，2022，**50**(7)：133-140.
Liu Y K, Li Y H, Chen Y, *et al*. Effects of slope position on carbon storage of *Larix olgensis* plantation forest ecosystem with different stand density[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2022, **50**(7): 133-140.

[55] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(3): 453-461.

[56] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, *et al*. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(7): 1592-1599.

[57] 梁珂，何丙辉．紫色土区典型土地利用方式下土壤碳、氮、磷生态化学计量特征分析[J]．西南大学学报(自然科学版)，2022，**44**(10)：29-36.
Liang K, He B H. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics under typical land uses in purple soil area[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, **44**(10): 29-36.

[58] Chen S P, Wang W T, Xu W T, *et al*. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, **115**(16): 4027-4032.

[59] Celik I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey[J]. Soil and Tillage Research, 2005, **83**(2): 270-277.

[60] Han X Y, Gao G Y, Li Z S, *et al*. Effects of plantation age and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen changes following afforestation in the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2019, **30**(18): 2298-2310.

[61] 熊杏，熊清华，郭熙，等．南方典型丘陵区耕地土壤全氮、有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]．植物营养与肥料学报，2020，**26**(9)：1656-1668.
Xiong X, Xiong Q H, Guo X, *et al*. Spatial variation characteristics of total nitrogen, organic carbon and ratio of carbon to nitrogen of cultivated land in typical hilly areas in south China and its influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(9): 1656-1668.

[62] 张春华，王宗明，居为民，等．松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]．环境科学，2011，**32**(5)：1407-1414.
Zhang C H, Wang Z M, Ju W M, *et al*. Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain Maize Belt[J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1407-1414.

[63] 刘金山，戴健，刘洋，等．过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响[J]．植物营养与肥料学报，2015，**21**(1)：112-120.
Liu J S, Dai J, Liu Y, *et al*. Effects of excessive nitrogen fertilization on soil organic carbon and nitrogen and nitrogen supply capacity in dryland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(1): 112-120.

[64] Arevalo C B M, Bhatti J S, Chang S X, *et al*. Ecosystem carbon stocks and distribution under different land-uses in north central Alberta, Canada[J]. Forest Ecology and Management, 2009, **257**(8): 1776-1785.

[65] Hu C J, Fu B J, Liu G H, *et al*. Vegetation patterns influence on soil microbial biomass and functional diversity in a hilly area of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(6): 1082-1091.

HUANJING KEXUE
Environmental Science (monthly)
Vol. 45 No. 1
Jan. 15, 2024

CONTENTS