

坡度和坡位对植烟坡地紫色土 有机碳氮变化的影响

谢柠枌¹ 王棋¹ 李冰¹ 王昌全¹ 朱华清¹ 王君立¹ 谢云波² 陈玉蓝³¹

(1. 四川农业大学资源学院, 四川 成都 611130;

2. 中国烟草总公司四川省公司, 四川 成都 610041;

3. 四川省烟草公司凉山州公司, 四川 西昌 615000)

【摘要】: 为研究坡度、坡位等地形因素对土壤碳氮变化的影响, 以川西南植烟紫色土为对象, 探究了坡度、坡位及其交互作用下不同层次(0~20、20~40cm)土壤有机碳、全氮含量及碳氮比的变化特征。结果表明: (1)土壤有机碳、全氮含量总体偏低, 变异系数均为0~20cm>20~40cm, 而碳氮比的变异系数则表现为20~40cm>0~20cm; (2)随坡度增加, 土壤有机碳、全氮含量及碳氮比逐渐降低, 其中有机碳和全氮在0°~5°与5°~20°间差异显著; 相比于0°~5°, 其他坡度土壤有机碳降幅为10.07%~28.69%, 全氮降幅为3.72%~23.74%; (3)随坡位下降, 土壤有机碳和全氮含量增加, 以全氮增幅较大, 相对于上坡位, 中、下坡位土壤有机碳增幅为6.48%~15.98%, 全氮增幅为13.43%~30.34%。碳氮比随坡位下降而降低, 但差异不显著; (4)坡度主要影响有机碳含量变化, 坡位则对全氮及碳氮比变化影响明显, 坡度坡位交互效应尤其显著。总体来看, 随坡度增大, 土壤有机碳显著下降, 坡位越高, 土壤全氮下降越显著, 土壤碳氮比上升越显著, 尤以20~40cm土层中上、中坡位碳氮变化协调性差, 碳氮比随坡位增高显著上升。

【关键词】: 坡度 坡位 植烟土壤 碳氮变化

【中图分类号】: X53; X825 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)09-2245-08

土壤有机碳和全氮是土壤碳库和氮库的重要组成部分^[1], 也是土壤肥力和质量的重要指标。在小、微尺度上, 坡度和坡位上水热条件及植被生长等的差异, 直接影响土壤有机碳和全氮的含量和分布^[2,3]。然而, 在不同研究区域, 受其独特的地形地貌影响, 有机碳氮在不同坡度、坡位上所体现的差异也不尽相同。傅涛等^[4]认为土壤有机质和全氮含量随生境坡度增加而减小, 但也有人认为15°左右的坡地土壤碳氮的含量最高^[5], 甚至有变化趋势完全相反的结果^[6]。坡位对土壤碳氮的空间分布也有显著影响^[7], 土壤有机碳和全氮含量在下坡位和上坡位中的分布比较稳定, 一般呈现下坡位>上坡位的变化趋势^[8,9], 而中坡位的碳氮含量多在上坡位与下坡位之间^[10,11], 但也有呈现中坡位的碳氮含量高于上坡位或下坡位的状况^[12]。坡度和坡位交互作用展示了两因子在同一水平上的相互影响程度。有研究表明, 坡度坡位交互作用下, 土壤养分与在坡位和坡度单个因子作用下的变化趋于一致,

作者简介: 谢柠枌(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤化学。E-mail: 896691228@qq.com

李冰, E-mail: benglee@sicau.edu.cn;

陈玉蓝, 369507968@qq.com

基金项目: 中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC201705, SCYC201803); 四川省烟草公司凉山州公司科技项目(LSYC201801)

但差异不显著^[13]。目前,探究坡度、坡位等地形因子对土壤碳氮的研究主要还是在森林土壤中^[11,14],在耕地土壤的研究较少,综合考虑地形因子间的交叉作用的研究更少见。

四川凉山州因其得天独厚的自然条件,生产的烟叶质量优良,是我国最适宜烟叶生产的地区之一,该区年烤烟产量占四川省全年产量的70%以上。凉山州山地面积广,紫色土分布多,但是其坡面上有机碳氮分布情况并不清楚,这直接影响土壤培肥方向的针对性,甚至可能引起区域性碳氮养分失衡,影响烤烟产质。因此,通过川西南烟区典型植烟坡地紫色土有机碳和氮变化分析,探究坡度及坡位因素对土壤有机碳、全氮以及碳氮比的影响,为川西南烟区土壤碳氮的合理调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

凉山州位于四川省西南部横断山区的东北部,青藏高原南缘,是四川盆地与云南省中部高原之间的过渡地带,地质构造复杂,地貌类型多种多样,土壤类型较多,但植烟土壤以红壤、紫色土为主。凉山烟区主要分布在海拔380~2500m的河谷、丘陵、二半山区域。该区域属于亚热带季风气候,干湿分明,各月份降水量最大差值接近260mm。冬半年日照充足,少雨干暖;夏半年云雨较多,降水量集中在4~9月,气候凉爽。

1.2 土壤样品采集与分析测试

在种植模式及植烟年限(10~20年)基本相同的基础上,参照陈冲等^[2]和Qin等^[15]的方法,依据坡度、坡位划分等级,分别布点采样。在划分出下坡位(距离坡顶大于2/3处及其以下的坡面)、中坡位(上坡位与下坡位之间的坡面部分)、上坡位(距离坡顶1/3处及其以上的坡面)3个区域基础上,再依据坡度划分布点,依次为0°~5°、5°~10°、10°~15°和15°~20°(样品所在地坡度均未超过20°)。于2017年3月在烤烟未施底肥及移栽之前,在凉山州会东县植烟区紫色土上共设样点40对,每个样点分别采集0~20和20~40cm土层土壤,土样经风干、研磨、过筛后测定。

土壤有机碳氮含量测定按常规方法进行^[16]。土壤有机碳用重铬酸钾外加热法测定,全氮用半微量凯氏定氮法测定,碳氮比为元素质量比。

1.3 数据处理与统计分析

采用Excel2010和SPSS20.0进行数据整理和统计分析。在方差分析之前,依据K-S正态分布检验概率进行检验,再对符合正态分布的数据项进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤碳、氮及碳氮比

由表1可知,0~20cm土层土壤有机碳含量为8.44g/kg,全氮为0.84g/kg,碳氮比为10.06,按照第二次土壤普查养分分级标准,土壤碳氮含量均属于中下水平。有机碳、全氮及碳氮比均随着土层的加深而减小,与0~20cm相比,20~40cm土层分别下降了18.73%、11.32%和7.78%。各土壤剖面层变异系数7.01%~16.02%,表现出弱中等变异性,说明土壤碳氮含量及碳氮比总体分布在一个相对集中的范围内。变异程度由大到小依次为有机碳、全氮和碳氮比,有机碳和全氮的变异系数均为0~20cm>20~40cm,而碳氮比则表现为20~40cm>0~20cm。不同土层土壤有机碳、全氮和碳氮比值均符合近似正态分布(W值>0.05)。

表 1 土壤有机碳、全氮和碳氮比的统计特征

项目		均值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	极小值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	极大值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数 (%)	W 值
0~20cm(n=40)	SOC	8.44	1.35	5.93	10.98	16.02	0.64
	TN	0.84	0.13	0.59	1.07	15.45	0.76
	C/N	10.06	0.70	8.37	11.67	7.01	0.98
20~40cm(n=40)	SOC	6.86	1.01	5.09	9.91	14.69	0.72
	TN	0.75	0.11	0.53	1.05	14.84	0.59
	C/N	9.28	1.15	6.44	12.74	12.38	0.50

2.2 坡度对土壤碳氮变化的影响

土壤有机碳、全氮及碳氮比总体呈现随坡度的增加而下降的趋势，碳氮变化基本同步(图 1)。在 0~20cm 土层中， $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 坡地有机碳含量 ($9.99\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著高于 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ($8.18\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ($8.18\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ($7.12\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)；20~40cm 土层中，仅 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ($7.58\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ($6.10\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 间差异显著。在 0~20cm 土层中， $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 坡地全氮含量 ($0.96\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著高于 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ($0.82\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ($0.82\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ($0.74\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)；20~40cm 土层中，各坡度间土壤全氮含量差异不显著。同一土层各坡度间的碳氮比均无显著差异。

0~20cm 土层，与 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 坡地相比， $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 及 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 坡地有机碳含量分别下降了 18.06%、18.15% 和 28.69%，全氮含量分别下降了 14.88%、15.30% 和 23.74%；20~40cm 土层，相对于 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ， $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 及 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 有机碳含量分别下降了 10.07%、10.52% 和 19.62%，全氮含量分别下降了 3.72%、5.00% 及 10.11%。

2.3 坡位对土壤碳氮变化的影响

土壤有机碳、全氮和碳氮比在坡位间变化显著，有机碳和全氮均随坡位的下降而增加，碳氮比则随坡位的下降而降低(图 2)。在 0~20cm 土层中，3 坡位间的有机碳含量无显著差异；20~40cm 土层，下坡位 ($7.35\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与上坡位 ($6.33\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中坡位 ($6.82\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 差异显著。在 0~20cm 土层中，全氮含量在下坡位 ($0.91\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与上坡位 ($0.75\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著差异，两土层变化一致。碳氮比，在 0~20cm 土层中，上坡位 (10.62) 与下坡位 (9.63) 间差异显著；20~40cm 土层，上坡位 (10.14) 与中坡位 (8.81)、下坡位 (9.00) 间差异显著。

0~20cm 土层，相对于上坡位，中坡位和下坡位有机碳含量分别增加了 6.48% 和 10.43%，全氮含量分别增加了 13.43% 和 22.03%；20~40cm 土层，相对于上坡位，中坡位和下坡位有机碳含量分别增加了 7.71% 和 15.98%，全氮含量分别增加了 24.18% 及 30.34%。

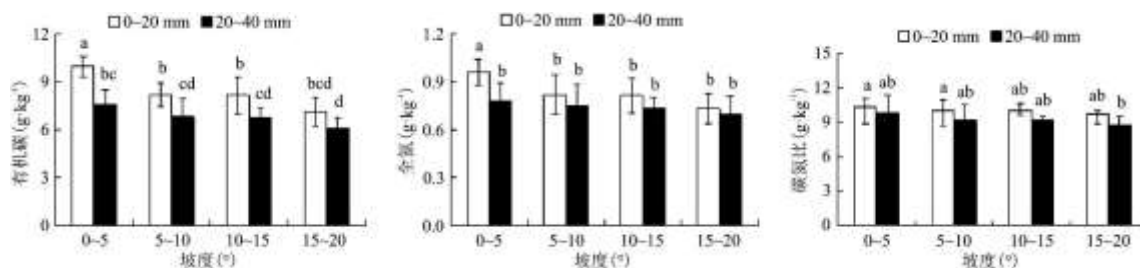


图 1 坡度对植烟土壤有机碳、全氮和碳氮比的影响

注：图中不同小写字母表示差异显著 P<0.05, 下同。

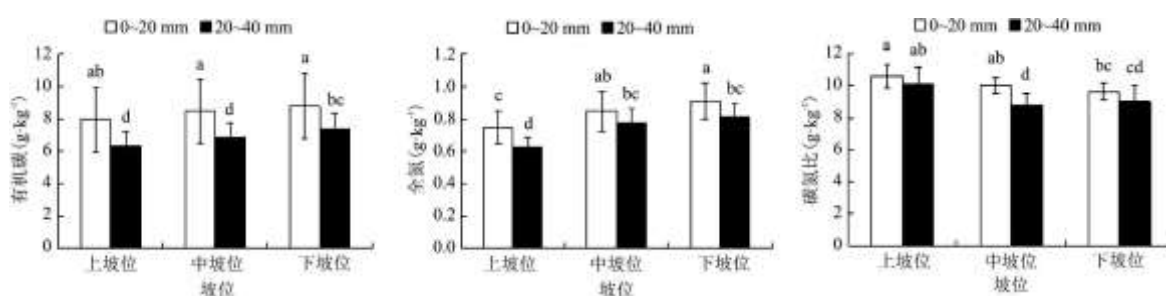


图 2 坡位对植烟土壤有机碳、全氮和碳氮比的影响

2.4 坡度和坡位交互作用对土壤碳氮变化的影响

由于 0° ~5° 与 5° ~20° 中有机碳与全氮含量差异显著,因而将坡度合并,重新划分为 2 个坡度(0° ~5° 和 5° ~20°)。由图 3、图 4 可知,同一坡位下不同坡度上有机碳、全氮及碳氮比总体趋势不变,与坡度单个因素相比,不同之处:20~40cm 土层,0° ~5° 与 5° ~20° 在上坡位的有机碳和碳氮比差异由原来的不显著变为显著。同一坡度下不同坡位上有机碳、全氮及碳氮比总体趋势不变,与坡位单个因素相比,不同之处:0~20cm 土层,上坡位与中坡位的全氮差异不显著,0° ~5° 上坡位与下坡位碳氮比差异不显著;20~40cm 土层,上、中坡位与下坡位的有机碳差异不显著,0° ~5° 有机碳含量为下坡位 (7.80g·kg⁻¹)>上坡位 (7.51g·kg⁻¹)>中坡位 (7.42g·kg⁻¹),碳氮比在上坡位与中、下坡位的差异在 5° ~20° 不显著。

在 0~20cm 土层中,坡度为 0° ~5° 时,与下坡位相比,土壤有机碳在中、上坡位分别下降了 2.94%和 7.92%,全氮含量随坡位上升分别下降了 4.63%和 15.44%;当坡度为 5° ~20° 时,土壤有机碳含量在中、上坡位分别较下坡位下降了 3.91%和 9.09%,全氮含量随坡位上升较下坡位分别下降了 8.87%和 18.34%。可见在表层土中,坡度限制了坡位对土壤碳氮含量的影响,坡度较大时,坡位对土壤碳氮的影响更明显。

由表 2 可知,在 0~20cm 土层,坡度对土壤有机碳和全氮含量影响极显著,坡位对全氮和碳氮比影响极显著,坡度和坡位交互作用对有机碳、全氮和碳氮比的影响都极显著。20~40cm 土层,坡度对土壤有机碳含量影响极显著,对全氮和碳氮比影响不显著;坡位对全氮和碳氮比影响极显著,对有机碳含量影响显著;坡度-坡位交互作用对有机碳、全氮和碳氮比的影响都极显著。

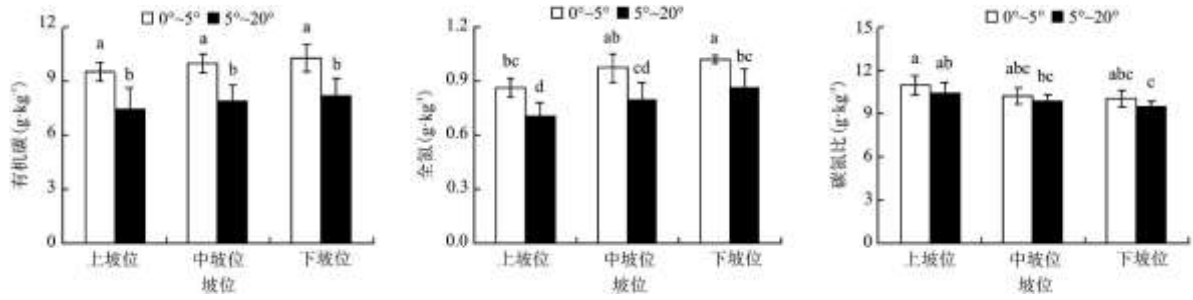


图 3 坡度、坡位对 0~20cm 土壤有机碳、全氮和碳氮比的影响

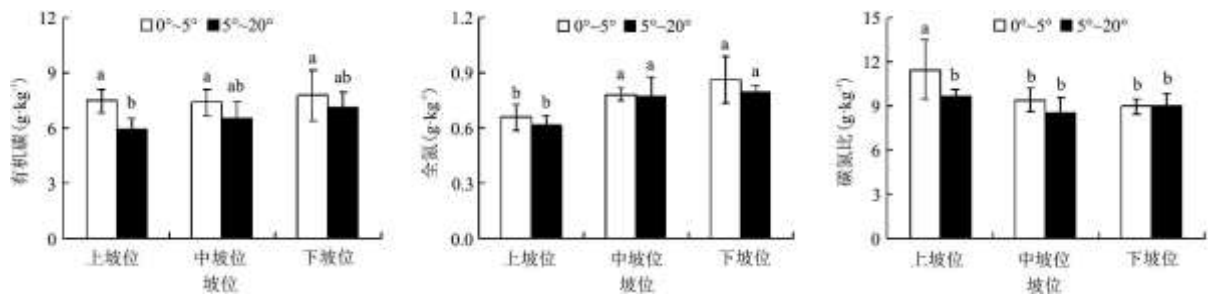


图 4 坡度、坡位对 20~40cm 土壤有机碳、全氮和碳氮比的影响

表 2 坡度坡位及其交互作用方差分析 (F 值)

土层 (cm)	因子	SOC	TN	C/N
0~20	坡度	39.73**	21.05**	3.59
	坡位	1.25	6.78**	8.94**
	坡度×坡位	8.76**	10.74**	5.09**
20~40	坡度	9.60**	1.52	4.06
	坡位	3.74*	21.25**	6.24**
	坡度×坡位	4.32**	9.15**	5.44**

3 讨论

本研究结果表明,土壤有机碳、全氮含量和碳氮比均为 0~20cm>20~40cm,这与人为活动对土壤养分的影响主要集中于可直接接触的表土层(0~20cm)^[17]密切相关,同时表层土壤的温度和通气条件适宜,风化程度也高于 20~40cm 土层,有机质分解和微生物活动活跃,使 0~20cm 土层的有机碳氮含量高于 20~40cm 土层。与有机碳和全氮相比,碳氮比的变异系数最小,趋于弱变异性,进一步证明农田土壤 C/N 相对稳定的结论^[18]。土壤有机碳和全氮的标准差和变异系数均为 0~20cm>20~40cm,这可能是因为 在 0~20cm 土层中,受植物生长过程和人为活动等因素影响碳氮比更大,有机质含量更高,微生物在分解时,消耗的有效氮素更多,在 20~40cm 土层中,受人为干扰少,主要受植物根系活动影响^[19],土层内碳氮变化相对稳定。

坡度对土壤理化性质的影响,主要通过影响水分流动与下渗、土壤颗粒性质、植被和土壤抗侵蚀能力等间接实现^[20]。本研究结果表明,在 20° 坡度范围内,土壤有机碳、全氮及碳氮比均呈现出随坡度上升而降低的趋势,与相关研究结果类似^[4,19]。这说明坡度越大,地表径流以及水分重力的淋洗作用越强,同时由于植被种类和覆盖率的不同,随坡度上升,土壤裸露面积增大,土壤侵蚀加剧^[21],土壤碳氮的流失越严重^[22]。研究表明坡度导致的水土流失量与土壤养分流失成正比,最终形成不同坡度下较为稳定的土壤特征^[5],因而有机碳含量在下降更多的基础上,仍能在全氮在坡度上保持基本一致的变化幅度,使得碳氮比相对稳定。5° 是影响水土保持措施的一个临界坡度^[23],而当坡度增加到 15° 后,产沙量随坡度升高明显增加^[24],水土流失风险增大,保水保肥能力下降,侵蚀危险度高。且在坡度为 15° ~20° 时,土壤接受的太阳辐射最大,蒸发量大,不利于有机碳氮的富集^[13]。因而,在 0~20 和 20~40cm 土层中,有机碳、全氮及碳氮比在 5° ~10° 或在 15° ~20° 时下降更加明显。

坡位变化是影响土壤理化性质的关键因子^[6],坡位上养分差异主要是由坡面土壤性质和坡面降雨侵蚀堆积的重分配作用造成的。研究区中,上坡位植被覆盖少,土壤发育差,土层浅薄、砾石含量高,土壤砂性强而粘性不足,土壤侵蚀严重,有机碳和全氮随流水向下流失,含量最低;下坡位位置低洼,堆积作用最强,且植被覆盖良好,土壤发育成熟,土壤粘性强于中、上坡位,碳氮含量也最高,这一结果与赵文慧^[25]和林维等^[26]的研究结果相似。然而中下坡位与上坡位土壤环境相差较大,直接导致中下坡位土壤碳氮含量明显高于上坡位^[27]。坡位上,全氮的增加幅度高于有机碳,可能是在烤烟施肥时,有机肥施用较少,以及有机碳和全氮的迁移速率不同,导致有机碳积累少,也使得不同土层中土壤碳氮比变化规律与碳氮基本相反^[1,28],同时当地充足的降雨量以及雨水和土壤的 pH 会影响土壤有机碳的溶解度和形态,当地冬夏两季干湿分明,这会影响土壤中团聚体的发育,改变微生物呼吸强度,进而影响有机碳的含量。在中上坡位,碳氮变化的协同性下降,宋依璇等^[29]的研究也显示,有机碳和全氮在下坡位显著正相关,且随着坡位的上升相关性逐渐减弱,因为不同坡位上水热条件及微生物量的差异^[30],会导致碳氮累积程度各不相同^[31]。

坡度坡位交互作用明显,土壤碳、氮及碳氮比与在坡位和坡度单个因子作用下的变化趋于一致。在同一坡位上,0° ~5° 与 5° ~20° 间的分异程度基本未被改变;在同一坡度条件下,20~40cm 上的有机碳和碳氮比的差异与坡位单个因素下有所不同。说明坡位对碳、氮及碳氮在坡度上的分异特征影响不明显,但坡位对碳氮及碳氮比的影响受到坡度一定程度限制,尤其是在 20~40cm 土层和上坡位。研究表明,不同坡位土壤理化性质总体表现出坡下>坡中>坡上^[32,33],坡上位的土壤相对其他坡位更容易退化^[34],中坡位的不稳定碳占比最高^[35]。本研究表明,20~40cm 土层上、中坡位土壤,受到坡位本身及坡度的影响,碳氮含量提高及碳氮比平衡调控难度相对更大。

4 结论

土壤有机碳、全氮含量均属于中下等级水平,弱中等程度变异,并随土层加深而降低。0~20cm 土层土壤有机碳和全氮的变异系数高于 20~40cm 土层,碳氮比的变异系数表现相反。

坡度、坡位对有机碳氮均有不同程度影响。坡度增大降低了有机碳、全氮及碳氮比,尤以有机碳含量变化显著;坡位升高,显著降低土壤有机碳和全氮含量,但提高了土壤碳氮比。

坡度和坡位交互作用对有机碳、全氮及碳氮比影响显著,坡度上的分异特征基本不受坡位影响,而坡度对不同坡位上土壤有机碳氮产生显著影响,尤其表现在 20~40cm 土层和上、中坡位土壤;坡度越大,坡位对表层土壤(0~20cm)碳氮变化影响越明显。坡度对有机碳影响显著,坡位对全氮和碳氮比影响显著;20~40cm 土层,上、中坡位碳氮变化协调性差,碳氮比显著下降。

参考文献:

[1] 宫立, 刘国华, 李宗善, 等. 川西卧龙岷江冷杉林土壤有机碳组分与氮素关系随海拔梯度的变化特征[J]. 生态学报,

2017, 37(14):4696-4705.

[2]陈冲,周卫军,郑超,等.红壤丘陵区坡度与坡向对耕地土壤养分空间差异的影响[J].湖南农业科学,2011,(23):53-56.

[3]ZHU H, WU J, GUO S, et al. Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau[J]. Catena, 2014, 120:64-72.

[4]傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-74,101.

[5]翟朝阳,邱娟,司洪章,等.微地形对大西沟新疆野杏萌发层土壤因子的影响[J].生态学报,2019,39(6),2168-2179.

[6]张金茜,巩杰,柳冬青.甘肃白龙江流域土壤有机碳与全氮储量的空间格局特征[J].土壤通报,2018,49(1):23-30.

[7]侯莹,刘凌哲.不同坡位和雨水处理对沟谷地土壤有机碳、氮的影响[J].西部大开发(土地开发工程研究),2018,3(1):38-41.

[8]何燕,李廷轩,王永东.低山丘陵区不同坡位茶园土壤有机碳特征研究[J].水土保持学报,2009,23(2):122-126.

[9]LI Y, LINDSTROM M J. Evaluating soil quality~soil redistribution relationship on terraces and steep hillslope [J]. Soil Science Society of America Journal. 2001, 65(5):1500-1508.

[10]邓司马,何国良,杨杰,等.不同坡向坡位对毛竹林生长及土壤因子的影响[J].湖南林业科技,2016,43(3):79-82.

[11]潘树林,周顺涛,辜彬.坡度和坡位对岩质边坡早期生态恢复土壤养分变异性的影响[J].水土保持研究,2012,19(4):289-292.

[12]冯雪瑾,张志华,杨喜田,等.太行山低山丘陵区人工林表层土壤有机碳和全氮分布特征[J].应用生态学报,2019,30(2):511-517.

[13]邓欧平,周稀,黄萍萍,等.川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J].资源科学,2013,35(12),2434-2443.

[14]荣欣,易桂花,张廷斌,等.2000~2015年川西高原植被 EVI 海拔梯度变化及其对气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2019,28(12):3014-3028.

[15]QIN C Z, ZHU A X, SHI X, et al. Quantification of spatial gradation of slope positions[J]. Geomorphology, 2009, 110(4):1-19.

[16]鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2000.

[17]刘勇军,彭曙光,肖艳松,等.湖南烟稻轮作区土壤团聚体稳定性及其与碳氮比的关系[J].中国烟草学报,2020,26(1):75-83.

-
- [18]HUANG Y M,DONG L,AN S S.Effects of slope aspect on soil nitrogen and microbial properties in the Chinese Loess Region.Catena, 2015, 125:135-145.
- [19]徐国策. 丹江中游小流域氮素分布与流失机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [20]吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5):858~869.
- [21]何莎莎, 朱文博, 崔耀平, 等. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2):426-439.
- [22]赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):28-38.
- [23]张天宇, 郝燕芳. 东北地区坡耕地空间分布及其对水土保持的启示[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2):190-194.
- [24]赵龙山, 侯瑞, 吴发启, 等. 坡度对农业耕作措施水土保持作用的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):69-72.
- [25]赵文慧. 黄土高原典型流域的植被特征及土壤养分响应的空间差异[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [26]林维, 崔晓阳. 地形因子对大兴安岭北端寒温带针叶林土壤有机碳储量的影响[J]. 森林工程, 2017, 33(3):1-6.
- [27]LIU J,QIU L,WANG X,et al.Effects of wildfire and topography on soil nutrients in a semiarid restored grassland[J].Plant and Soil, 2018, 428(1-2):1-14.
- [28]南雅芳, 郭胜利, 张彦军, 等. 坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3):595-601.
- [29]宋依璇, 邓继峰, 李景浩, 等. 辽西北典型人工林地不同坡位土壤养分特征及与林木生长性状的关系[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3):18-24.
- [30]李超然, 温仲明, 李鸣雷, 等. 黄土丘陵沟壑区地形变化对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(16):5436-5443.
- [31]DENG L,SHANGGUAN Z P.Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China[J].Land Degradation & Development, 2017, 28:151-165.
- [32]白云星, 周运超. 贵州省后寨河小流域地形因子、人为干扰与石漠化定量研究[J]. 生态学报, 2019, 39(19):7087-7096.
- [33]姚颖, 刘建明, 刘忠玲, 等. 不同坡位山杏天然林生长和土壤理化性质比较[J]. 森林工程, 2019, 35(6):36-41.
- [34]杨宽. 高山毛竹林不同坡位和土层深度的土壤理化性质[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(13):211-213, 216.
- [35]PRITPAL S,DINESH K B.Soil organic carbon pool changes in relation to slope position and land~use in Indian Lower Himalayas[J].Catena, 2018, 166:171-180.