



环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目：紫色土丘陵区退耕还林对坡地土壤碳氮空间分布的影响
作者：李子阳，刘伟，李春培，朱波，周明华
DOI：10.13227/j.hjkx.202309134
收稿日期：2023-09-15
网络首发日期：2023-11-01
引用格式：李子阳，刘伟，李春培，朱波，周明华. 紫色土丘陵区退耕还林对坡地土壤碳氮空间分布的影响[J/OL]. 环境科学.
<https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202309134>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

紫色丘陵区退耕还林对坡地土壤碳氮空间分布的影响

李子阳^{1,2}, 刘伟³, 李春培^{1,2}, 朱波¹, 周明华^{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; 3. 四川省泸州市叙永县农业农村局, 泸州 646400)

摘要: 为了弥补我国四川盆地紫色丘陵区退耕还林对坡地土壤碳(C)和氮(N)时空分布影响的研究不足, 依托中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站在万安小流域建立的长期观测样地, 对比分析了约30年历史的退耕林地及其邻近的坡耕地不同坡面位置土壤的C、N形态、含量及其储量。结果发现, 退耕还林后, 显著增加了剖面土壤有机碳(SOC)含量及储量($P < 0.05$), 其中表层土壤(0~20 cm)SOC储量增加了 $25.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 年均SOC储量增加速率为 $0.89 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。土壤总氮(TN)含量虽略有增加, 但仅限于0~20 cm土层。退耕林地与坡耕地相比, 速效C、N养分如, 土壤硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)和可溶性有机碳(DOC)含量在整个土壤剖面(0~70 cm)的差异性基本不显著($P > 0.05$)。此外, 研究还发现空间位置对坡耕地土壤TN、SOC、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和DOC含量均有显著影响($P < 0.05$); 土壤TN和SOC含量沿坡面的变化趋势大小为: 下坡位>上坡位>中坡位, 而土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和DOC含量沿坡面的变化趋势大小则为: 上坡位<中坡位<下坡位。退耕林地土壤仅DOC含量受坡位的显著影响, 并沿坡面向下呈增加趋势。结果表明, 在评估紫色丘陵区土地利用变化对土壤碳氮储量的影响时不能忽视地形等因素对其的影响。

关键词: 紫色土; 退耕还林; 坡位; 氮(N); 碳(C); 空间分布

DOI: 10.13227/j.hjxk.202309134

Effects of “Grain for Green” on the Spatial Distribution of Soil Carbon and Nitrogen in Purple Hilly Area of China

LI Zi-yang^{1,2}, LIU Wei³, LI Chun-pei^{1,2}, ZHU Bo¹, ZHOU Ming-hua^{1*}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Growth 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; 3. Agricultural and Rural Bureau of Xuyong County, Luzhou City, Sichuan Province, Luzhou 646400, China)

Abstract: In order to remedy the lack of research on the effect of “Grain for Green” on soil carbon (C) and nitrogen (N) distribution on slope soil in purple hilly areas of Sichuan Basin, China, a study was conducted on a long-term observation site established in Wanan small watershed of Yanting Agro-ecological Experimental Station of Purple Soil, Chinese Academy of Sciences. The morphology, content and storage of C and N in soil at different slope positions of farmland and the artificial forests in rehabilitated land with a history of about 30 years were compared. Our results showed that “Grain for Green” significantly increased soil organic carbon (SOC) content and SOC stock in the whole soil layers. The SOC stock of the surface layer (0-20 cm) increased by $25.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the annual SOC stocks ratio was $0.89 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. Soil total nitrogen (TN) content increased slightly, but only in 0-20 cm soil layer. Compared with sloping farmland, the differences of available

收稿日期: 2023-09-15; 修订日期: 2023-10-19

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: mhuzhou@imde.ac.cn

C and N nutrients such as soil nitrate N (NO_3^- -N), ammonia N (NH_4^+ -N), and dissolved organic C (DOC) in the whole soil profile (0-70 cm) were basically not significant ($P > 0.05$). In addition, our research also found that slope position had significant effects on the contents of TN, SOC, NO_3^- -N, NH_4^+ -N, and DOC in farmland soil ($P < 0.05$). The variation trend of soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N, and DOC contents along the slope was as follows: upper slope < middle slope < lower slope, while the soil TN and SOC contents were highest in lower slope and followed by upper slope and middle slope. The position of the slope had a significant impact only on DOC content in forest soil, which increased along the slope. This research indicated that when evaluating the impact of land use changes on soil C and N stocks in the purple soil hilly region, the influence of topographic factors cannot be ignored.

Key words: purple soil; “Grain for Green”; slope position; soil nitrogen (N); soil carbon (C); spatial variation

碳 (C) 元素和氮 (N) 元素是反映土壤质量的重要指标, 在关键的生物地球化学过程中起着举足轻重的作用^[1]。其中, 土壤有机碳 (SOC) 直接影响土壤肥力和土壤结构^[2], 土壤 N 素则作为植物生长的限制性营养因子, 决定了植物的净初级生产力^[3]。已有研究证明, 土壤 C、N 储量的微小变化可能对大气中二氧化碳 (CO_2) 和氧化亚氮 (N_2O) 浓度产生很大的影响, 从而间接加速了全球变暖的进程^[4]。因此, 维持土壤 C、N 的储量是改善土壤质量和减缓全球气候问题的关键因素, 将更好地促进可持续的环境恢复和生态安全。

植树造林被认为是增强土壤 C、N 储存的有效措施, 也是控制生态系统恢复的重要手段^[5-7]。而森林砍伐则会造成土壤养分流失, 改变土壤性质的空间分布, 从而导致全球范围内的土壤退化^[8]。20 世纪 90 年代以来, 中国实施了大规模的“退耕还林”生态修复工程, 以防治水土流失, 提高土壤肥力^[9], 截止到 2010 年, 大约有 $8.27 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的耕地转化为林地^[10]。在这期间, 许多研究调查了退耕还林对土壤性质和土壤侵蚀的影响, 但是结果并不统一。例如, Jia 等^[11]和 Wang 等^[12]在黄土高原的研究发现退耕还林后土壤 C、N 储量积累增加; 而 Yuan 等^[10]在长江三角洲冲击平原的研究发现退耕还林减少了 SOC 的储量和土壤中的其他有效组分。相互矛盾的结果说明除了土地利用变化的影响外, 退耕还林后土壤 C、N 变化还可能受到其他条件的影响, 例如气候因素、地形因素和人为因素等。因此, 在全球气候变化的背景下, 研究退耕还林后土壤 C、N 的动态变化, 以及各因素对 C、N 储存的影响具有重要意义。

紫色土坡耕地作为川中丘陵地区的典型土地利用类型, 具有地形多变, 整体结构差, 有机质含量低等特点^[13]。复杂的地貌特征势必会通过影响退耕还林前后植被恢复的类型和生长情况, 进而造成土壤 C、N 累积与分解过程不尽相同^[14]。此外, 不同坡面位置 (坡位) 的土壤侵蚀与泥沙沉积不同, 也显著影响着土壤 C、N 在坡面上的重新分配^[15, 16]。目前, 关于紫色土丘陵区退耕还林土壤 C、N 含量与储量的研究不足, 关注地形因素对土壤 C、N 空间分布的研究更少。因此, 本研究分别选取紫色土丘陵区退耕 29a 的柏树林坡地和常年坡耕地为研究对象, 采用野外调查采样与室内分析相结合的方法, 分析土壤 C、N 养分的空间分布特征和影响因素, 以为评估紫色土丘陵区推进退耕还林还草工程的效果提供理论依据。

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 $105^\circ 28'$, N

31°16′), 地处长江流域的二级子流域涪江流域, 为典型的川中丘陵沟渠集水区。该区域年平均气温为 17.3℃, 年均降水量为 826 mm (1981~2006 年), 其中 65% 的年降水量集中在 5~9 月, 属典型的亚热带季风气候^[17]。本研究的试验土壤为紫色土, 是我国川中丘陵地区一种主要的土壤类型^[18]。大部分紫色土区域土层较浅薄, 平均土层深度为 30~80 cm, 保水保肥差, 有机质和土壤 TN 含量低^[13]。近 30 年来, 由于中国退耕还林的政策实施, 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林地。截止到 2021 年, 该流域林地和坡耕地面积, 分别占总流域面积的 15.1% 和 22.4% (未发表数据)。

本研究主要在万安流域的两种主要土地利用类型 (坡耕地和退耕林地) 中选择 2 个相邻试验坡地, 长度分别为 130 m 和 140 m, 坡宽为 40 m。两个斜坡相距 70 m, 土壤类型一致, 均为沙溪庙组砂泥岩残坡积物发育的紫色土 (J2s)。坡面地形相似, 坡向为东南方位, 具体坡面参数见表 1。坡耕地为长期小麦-玉米轮作的耕作制度。其中小麦年施氮量为 130 kg·hm⁻² (以 N 计, 下同), 施磷量为 90 kg·hm⁻² (以 P 计, 下同), 施钾量为 36 kg·hm⁻² (以 K 计, 下同); 玉米年施氮量为 150 kg·hm⁻², 施磷量为 90 kg·hm⁻², 施钾量为 36 kg·hm⁻²。林地于 1994 年由坡耕地退耕, 退耕前的耕作制度与上述坡耕地一致。退耕后开始种植柏树, 植树年龄为 29a。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。

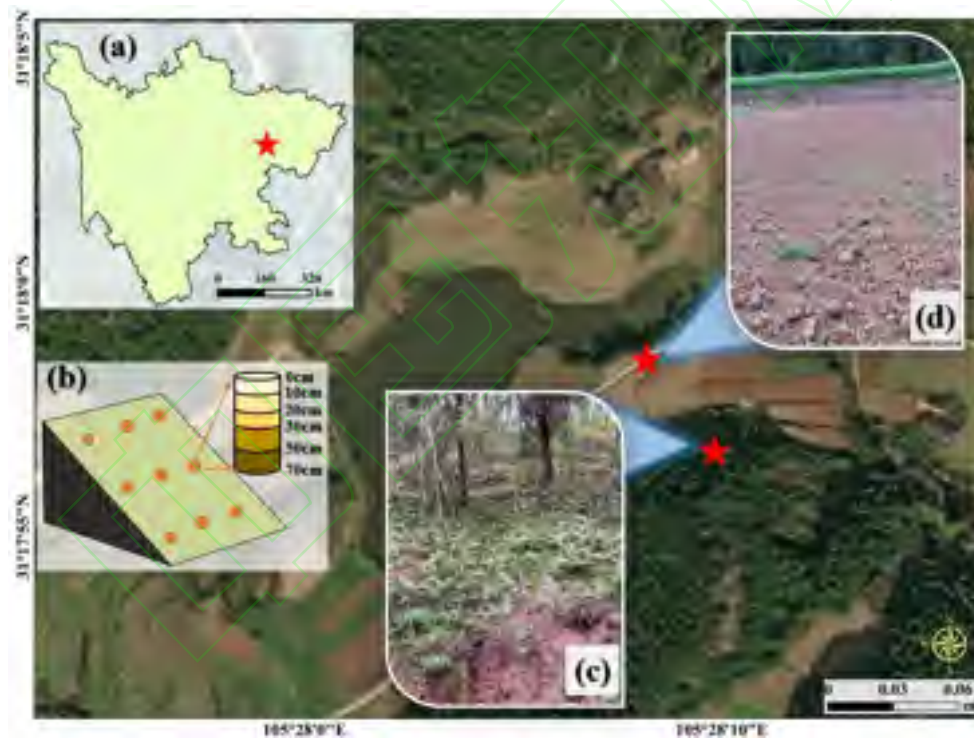


图 1 研究区位置和采样点位示意

Fig.1 Location of study area and sampling sites

表 1 采样坡面基础情况说明

Table 1 Description of sample slope basic condition

土地利用类型	坡位	坡向	距坡底的距离/m	坡度/(°)	植被类型
坡耕地	上坡位	东南	140	23	玉米-小麦轮作
	中坡位	东南	90	21	玉米-小麦轮作
	下坡位	东南	30	18	玉米-小麦轮作
退耕林地	上坡位	东南	130	27	柏树林
	中坡位	东南	80	23	柏树林
	下坡位	东南	30	19	柏树林

1.2 样品采集与测定

采样时间为 2023 年 3 月, 根据样地的具体地形, 参考 Brubaker 坡面划分原则, 将研究坡位分成上坡位、中坡位和下坡位 3 个部分^[19], 每个坡位随机选取 3 块 1.5 m×1.5 m 的中心样方。由于紫色土壤大部分采样点在 70 cm 左右即到达紫色土母岩, 所以本研究所有样点的采样深度均为 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, 每个样品重复采用梅花 5 点取样法混合成 1 袋, 共得到土壤样品 270 份 (2 个土地利用类型×3 个坡位×3 个样方×5 个土层×3 个样品重复)。采集的土壤样品平均分成 2 份, 一份自然风干磨碎 (分别过筛 10 目和 100 目待测), 另一份保存鲜样马上送入实验室待测。同时, 各采样点通过挖掘土壤剖面, 采集对应土层样品的标准环刀样品 (环刀容积 100 cm³), 采用 105 °C 烘干法测定各垂直土层土壤容重 (BD) 和土壤烘干含水量 (SWC)。利用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, 英国) 分析土壤粒径分布 (PSD)^[20]; 使用 pH 计 (Delta 320, 中国上海) 测定土壤 (土:水=1:5) 的 pH 值; 使用 1 mol·L⁻¹ 氯化钾溶液浸提土壤鲜样中的硝态氮 (NO₃⁻-N) 和铵态氮 (NH₄⁺-N), 使用煮沸的超纯水浸提土壤鲜样中的可溶性有机碳 (DOC), 并使用连续流动分析仪 (AA3, 德国 SEAL) 分析测定; 使用元素分析仪测定 (CNS Elementar vario MAX, 德国) 土壤 TN 含量^[21]; 采用高温外热重铬酸钾容量法测定 SOC 的含量^[22]。具体的操作细节和步骤请参考各指标测试方法引用的参考文献。

1.3 数据统计与分析

SOC 和 TN 储量 (Mg·hm⁻², 分别为 C 和 N 计, 下同) 计算如下^[23]:

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

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

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* 层采样土壤的土层深度 (cm), 0.1 为单位换算因子。

采用 Kolmogorov-Smirnov 检验原始数据的是否服从正态分布 ($P=0.05$), 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。使用 SPSS 23.0 (IBM, 美国) 软件进行单因素方差分析和双因素方差分析。使用 R (v.4.0.2) 软件包 “corrplot” 进行相关性分析。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), 分别计算各环境因素对土壤 C、N 分布差异的贡献度。

2 结果与分析

2.1 坡耕地和退耕林地土壤基础理化性质的空间分布特征

土壤理化性质在坡耕地和退耕林地坡面的具体分布情况如图 2 和表 3 所示。整体来看, 29 年的退耕还林并未严重改变土壤的基础理化性质, 但改变了其在坡面上的分布规律。两种土地利用方式土壤 pH 值的变化范围为 8.13~8.67。其中, 坡耕地下坡位的土壤 pH 在不同土层深度之间没有显著差异。在上坡位和中坡位, 坡耕地土壤的 pH 值随土层深度的增加而降低, 而退耕林地土壤的 pH 值则呈现相反的规律。此外, 坡耕地和退耕林地土壤 BD 在 0~10 cm 土层为 1.19~1.24 g·cm⁻³, 并随土层深度的增加而增加。退耕林地土壤 0~20 cm 土层和坡耕地土壤 50~70 cm 土层 SWC 最高, 分别为 15.5%~17.20% 和 20.93%~21.68%。其中, 退耕林地下坡位土壤的 SMC 显著高于上、中两坡位。坡耕地只有 30~50 cm 土层的 SWC 在 3 个坡位之间存在显著差异。本研究还发现两种土地利用类型土壤的粘土含量普遍高于 20%, 砂粒和粉粒含量分别在 7.7%~46.2% 和 27.0%~70.8% 之间, 表明该地区土壤质地类型

主要为粉砂壤土（图 2）。双因素方差分析表明（表 2），坡位和土层深度显著影响了坡耕地土壤的理化性质分布，例如土壤 pH、BD、SMC 和砂/粉/粘粒含量（ $P < 0.05$ ）；且两因子交互作用（坡位×土层深度）对这些土壤理化性质同样影响显著（ $P < 0.05$ ）。退耕林地除坡位对土壤 pH 和 BD 的影响不显著外（ $P > 0.05$ ），其余土壤理化性质参数与坡位和土层深度均呈显著相关关系（ $P < 0.05$ ）。

表 2 坡位和土层深度对土壤理化性质影响的双因素方差分析¹⁾

Table 2 Two-way analysis of variance to test the effects of slope positions and soil layers on soil physical properties

土地利用类型	项目	pH	BD	SWC	砂粒	粉粒	黏粒
坡耕地	坡位	0.004**	0.042*	0.000**	0.003**	0.006**	0.000**
	土层深度	0.000**	0.001**	0.000**	0.010*	0.002**	0.000**
	坡位×土层深度	0.003**	0.048*	0.016*	0.010*	0.011*	0.014*
退耕林地	坡位	0.249	0.181	0.000**	0.001**	0.000**	0.000**
	土层深度	0.002**	0.003**	0.004**	0.003**	0.045*	0.001**
	坡位×土层深度	0.510	0.026*	0.189	0.031*	0.000**	0.022*

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

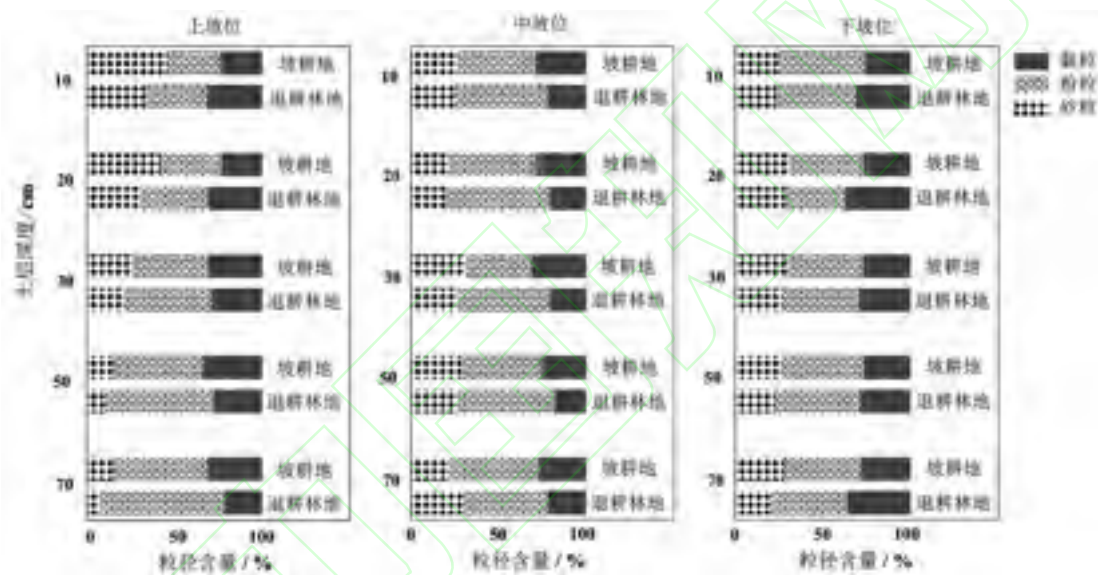


图 2 不同坡位土壤粒径组成含量的空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of PSD contents along soil layers at different slope positions

表 3 不同坡位土壤 pH 值、BD 和 SWC 的空间分布特征¹⁾

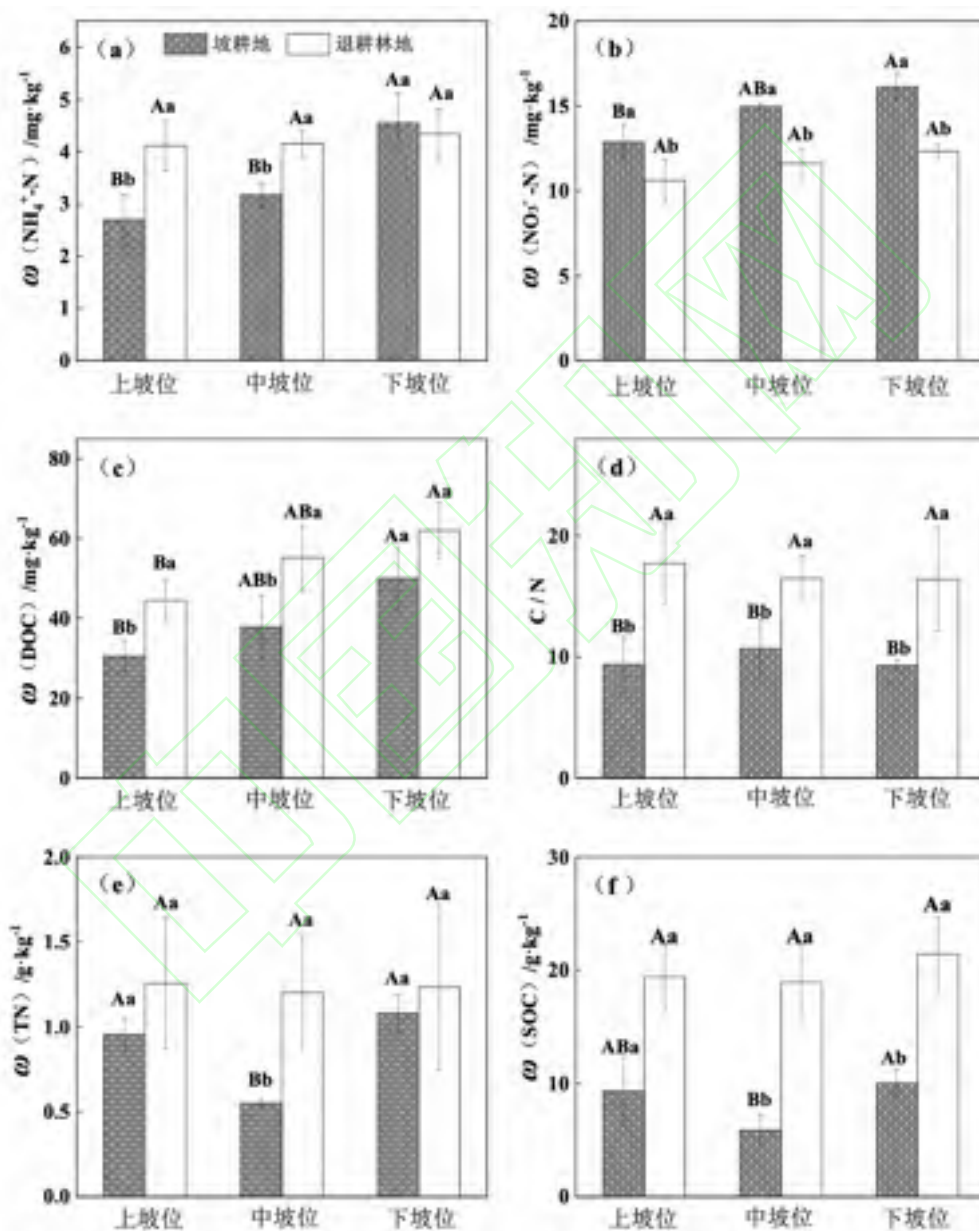
Table 3 Spatial distribution characteristics of soil pH, BD, and SWC in different slope positions

土地利用类型	土层深度/cm	pH			BD/Mg·m ⁻³			SWC /%		
		上坡位	中坡位	下坡位	上坡位	中坡位	下坡位	上坡位	中坡位	下坡位
坡耕地	0~10	8.53±0.07aB	8.67±0.21aA	8.41±0.03bC	1.22±0.09aA	1.24±0.02bA	1.19±0.03bA	15.56±1.64bA	15.18±0.04acA	15.81±1.19cA
	10~20	8.49±0.13abA	8.62±0.19aA	8.51±0.02aA	1.23±0.04aA	1.26±0.06abA	1.22±0.05abA	14.48±0.23bA	14.37±2.40cA	15.83±0.40cA
	20~30	8.37±0.12bB	8.47±0.15bAB	8.55±0.02aA	1.27±0.03aA	1.26±0.02abA	1.27±0.05aA	19.78±0.86aA	17.43±1.40bB	18.52±0.79bAB
	30~50	8.31±0.11bcB	8.28±0.08cB	8.50±0.01aA	1.25±0.03aA	1.27±0.03abA	1.23±0.04abA	20.57±0.74aB	21.23±1.85aA	21.55±0.52aA
	50~70	8.24±0.08cAB	8.13±0.14cB	8.39±0.09bA	1.30±0.02aA	1.31±0.04aA	1.28±0.07aA	20.93±0.77aA	21.29±1.73aA	21.68±1.96aA
退耕林地	0~10	8.28±0.07bA	8.26±0.15cA	8.38±0.03aA	1.13±0.03bA	1.14±0.04bA	1.15±0.04cA	15.58±1.72aB	15.59±2.07aB	17.20±1.87aA
	10~20	8.32±0.08bA	8.41±0.17bA	8.39±0.04aA	1.18±0.02abA	1.23±0.05aA	1.22±0.03bA	13.73±0.99abB	13.74±1.19abB	15.56±1.05abA
	20~30	8.42±0.09abA	8.47±0.15abA	8.43±0.02aA	1.21±0.01aA	1.25±0.03aA	1.23±0.04abA	14.16±2.02aA	12.71±0.41bB	14.81±1.07bA
	30~50	8.43±0.09abA	8.55±0.07aA	8.42±0.10aA	1.17±0.02abB	1.27±0.05aA	1.26±0.02abA	11.48±1.18bB	11.87±0.44bB	14.98±2.67bA
	50~70	8.50±0.04aAB	8.58±0.06aA	8.43±0.18aB	1.23±0.02aA	1.29±0.03aA	1.28±0.05aA	12.13±0.44bB	12.98±1.89bB	16.54±3.44aA

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 ($P<0.05$)

2.2 坡耕地和退耕林地土壤碳、氮含量的空间分布特征

本研究发现, 退耕林地土壤 C/N 和 ω (SOC) 在坡面的变化范围分别为 16.4~17.7 和 18.9~21.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在整个坡面均呈现出显著高于坡耕地土壤的现象 ($P < 0.05$) [图 3 (d) 和 3 (f)], 但土壤 NO_3^- -N 含量在坡面上的规律正好与之相反。在上坡位和中坡位, 退耕林地土壤 NH_4^+ -N 和 DOC 含量均显著高于坡耕地土壤, 但在下坡位二者 NH_4^+ -N 和 DOC 含量差异不显著 ($P > 0.05$) [图 3 (a) ~3 (c)]。两种土地利用类型间土壤 TN 含量差异较小, 退耕林地坡面土壤 ω (TN) 的变化范围为 1.2~1.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 坡耕地坡面土壤 ω (TN) 的变化范围为 0.6~1.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。仅在中坡位, 退耕林地土壤 TN 含量显著高于坡耕地土壤[图 3 (e)]。

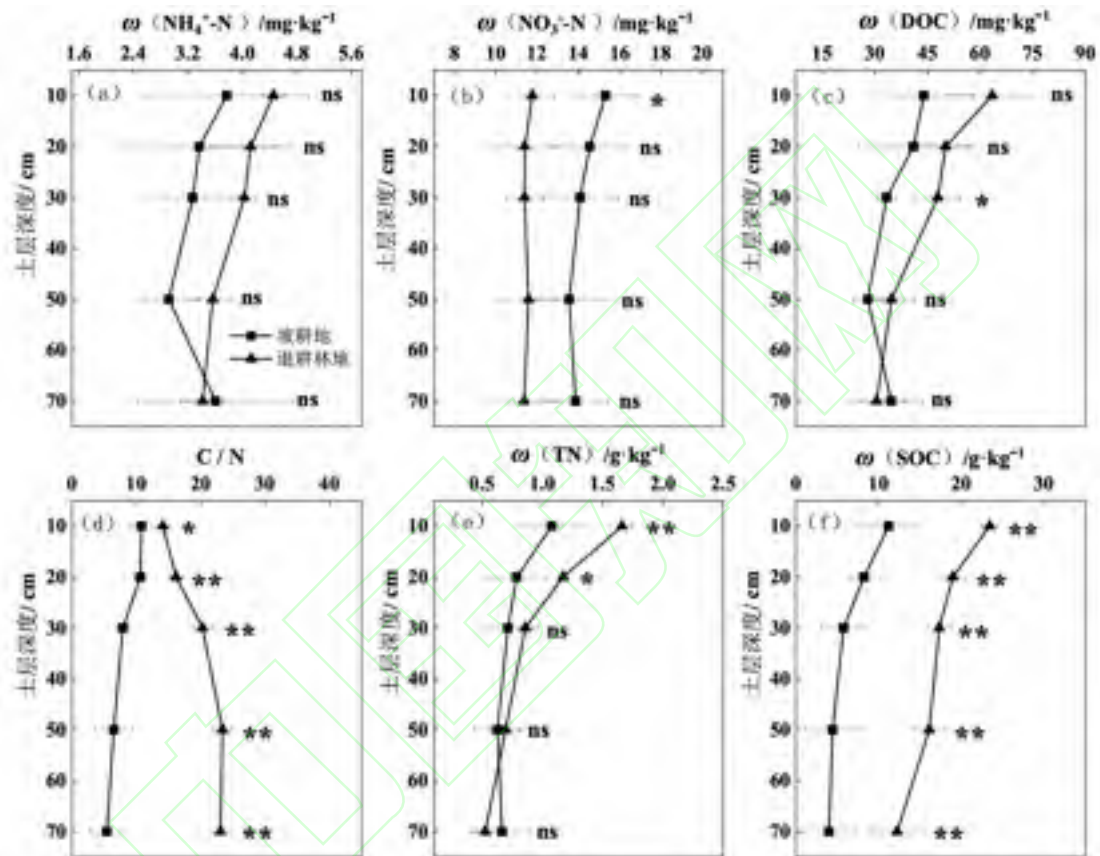


不同大写字母表示同一土地利用类型不同坡位间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一坡位不同土地利用类型间的差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 坡耕地和退耕林地不同坡位土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、DOC、C/N、TN 和 SOC 含量的空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution of NH_4^+ -N, NO_3^- -N, DOC, C/N, TN, and SOC contents along soil layers at different slope positions

退耕林地和坡耕地土壤 $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 在 0~70 cm 土层深度的变化范围分别为 3.4~4.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2.9~3.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在整个土层剖面均无显著差异[图 4 (a)]。在 0~10 cm 土层, 坡耕地退耕林地 $\omega(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 为 11.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著低于坡耕地土壤 (15.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其余土层深度虽然具有相同的数值规律, 但二者之间的差异性不显著, 不具有统计学意义 [$P > 0.05$, 图 4 (b)]。退耕林地土壤 0~70 cm 土层 C/N 和 SOC 含量均高于坡耕地土壤, 且各土层深度差异显著 [$P < 0.05$, 图 4 (d) 和 (f)]。对于土壤 TN 含量来说, 仅在 0~20 cm 土层出现了退耕林地土壤 TN 含量显著高于坡耕地土壤的现象[图 4 (e)]。同样的, 仅在 20~30 cm 土层出现了退耕林地 DOC 含量显著高于坡耕地坡面的现象 ($P < 0.05$), 其余土层深度两种土地利用类型间没有显著差异[图 4 (c)]。



ns 表示无显著性差异, *表示显著性水平 $P < 0.05$, **表示极显著性水平 $P < 0.01$

图 4 坡耕地和退耕林地土壤剖面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC、C/N、TN 和 SOC 含量的空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, DOC, C/N, TN, and SOC contents along different soil layers

此外, 本研究还发现, 退耕还林 29a 后, 坡耕地和退耕林地土壤 C、N 养分含量在坡面的分布规律并不一致。坡耕地土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 DOC 含量与坡位呈显著相关关系 ($P < 0.05$, 表 4), 且含量由上坡位至下坡位逐渐升高[图 3 (a)~3 (c)]。虽然坡耕地土壤 TN 和 SOC 含量同样受到坡位的显著影响 ($P < 0.05$), 但是中坡位的 TN 和 SOC 含量显著低于上、下两坡位[图 3 (e) 和 3 (f)]。坡位对坡耕地土壤 C/N 的影响不明显 ($P > 0.05$), 变化范围为 9.3~10.7[图 3 (d)]。退耕林地坡面除土壤 DOC 含量由坡上至坡下显著增加外[图 3 (c)], 其他土壤 C、N 养分指标均不受坡位变化的影响 ($P > 0.05$, 表 4)。

除土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量外 ($P > 0.05$), 坡耕地和退耕林地土壤其余 C、N 养分指标均受到土层深度的显著影响 ($P < 0.05$)。退耕林地土壤 $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 和 $\omega(\text{DOC})$ 在 0~10 cm 土层最高, 分别为 4.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 63.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 并随着土层深度增加而逐渐降低; 坡耕地土壤

NH₄⁺-N 和 DOC 含量在 0~50 cm 土层呈现出相同的变化趋势，但在 50~70 cm 土层出现拐点导致含量增加[图 4 (a) 和 4 (c)]。坡耕地土壤 C/N 随土壤深度的增加而降低，在 50~70 cm 土层达到整个土层剖面的最低值 5.4；与之相反，退耕地土壤 C/N 的随土壤深度的增加而增加，在 50 ~ 70 cm 土层达到整个土层剖面的最高值 23.4[图 4 (d)]。坡耕地和退耕地均呈现 0~10 cm 土层的 TN 含量最高，并随土壤深度的增加而增加的趋势，变化范围分别是：0.6~1.1 g·kg⁻¹（坡耕地）和 0.5~1.7 g·kg⁻¹（退耕地）[图 4 (e)]。同样的规律也出现在 SOC 含量随土层深度变化上[坡耕地为 4.0~11.2 g·kg⁻¹ 和退耕地为 12.2~23.4 g·kg⁻¹，图 4 (f)]。

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

土地利用类型	项目	TN	SOC	C/N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	DOC
坡耕地	坡位	0.000**	0.000**	0.390	0.000**	0.000**	0.020*
	土层深度	0.000**	0.000**	0.002**	0.016*	0.415	0.042*
	坡位×土层深度	0.043*	0.000**	0.307	0.358	0.944	0.123
退耕地	坡位	0.271	0.620	0.906	0.450	0.159	0.000**
	土层深度	0.000**	0.039*	0.003**	0.002**	0.967	0.000**
	坡位×土层深度	0.828	0.895	0.464	0.278	0.384	0.909

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

2.3 坡耕地和退耕地土壤碳、氮储量的空间分布特征

土壤 TN 和 SOC 储量的空间分布如表 5 所示。整体来看，退耕还林 29a 后，表层土壤（0~20 cm）的 TN 储量在坡耕地和退耕地间没有显著差异（ $P > 0.05$ ），但 SOC 储量增加 25.86 t·hm⁻²，SOC 储量的年均增加速率为 0.89 t·hm⁻²。退耕地坡面 0~70 cm 土层 SOC 储量在不同坡位的变化范围为 128.24~156.78 t·hm⁻²，均显著高于坡耕地土壤（32.55~77.28 t·hm⁻²）。此外，0~70 cm 坡耕地坡面土壤 TN 储量和 SOC 储量均呈现出下坡位>上坡位>中坡位的规律，其中上坡位、中坡位和下坡位的土壤 TN 储量分别为 6.44、4.58 和 8.42 t·hm⁻²，中坡位土壤 TN 储量显著低于下坡位（ $P < 0.05$ ），二者相差 3.84 t·hm⁻²。坡耕地下坡位 SOC 储量（0~70 cm）为 77.28 t·hm⁻²，显著高于上坡位（47.35 t·hm⁻²）和中坡位（32.55 t·hm⁻²）的 SOC 储量。退耕地坡面 0~70 cm 土层 TN 储量在不同坡位的变化范围为 6.91~7.92 t·hm⁻²。其中，上坡位 TN 储量最高，但 3 个坡位之间的差异并不显著（ $P > 0.05$ ）。

表 5 不同坡位土壤 TN 和 SOC 储量的空间分布特征¹⁾

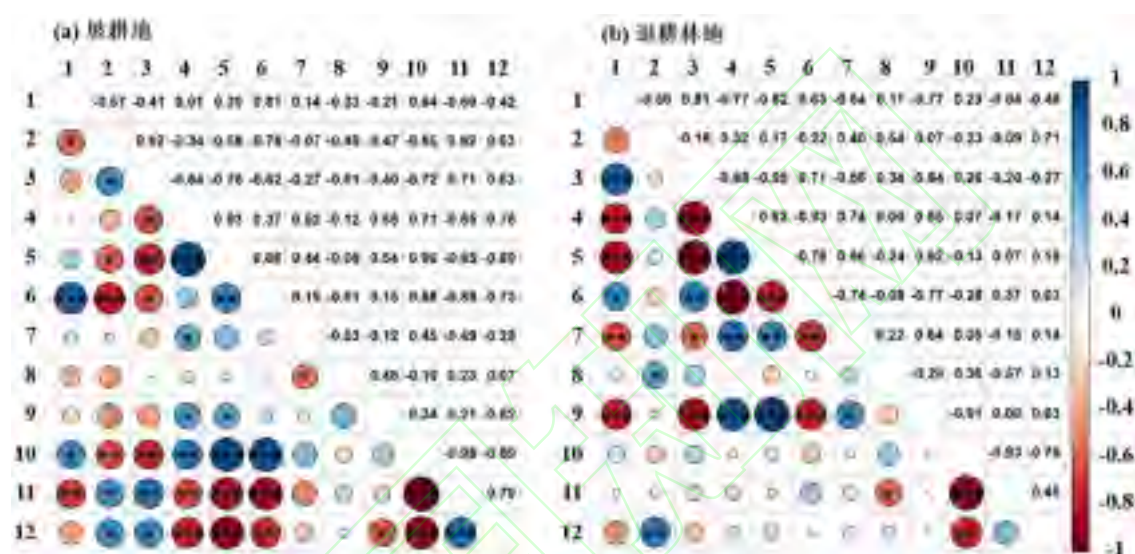
Table 5 Spatial distribution characteristics of soil TN and SOC stocks in different slope positions

土地利用类型	土层深度/cm	TN 储量 (以 N 计) /t·hm ⁻²				SOC 储量 (以 C 计) /t·hm ⁻²			
		上坡位	中坡位	下坡位	平均值	上坡位	中坡位	下坡位	平均值
坡耕地	0~10	1.79±0.20	0.70±0.12	1.43±0.04	1.31±0.55	18.35±0.30	8.92±2.65	13.53±0.65	13.60±4.72
	10~20	1.00±0.21	0.66±0.26	1.25±0.10	0.97±0.29	11.08±4.49	7.45±2.89	11.93±0.15	10.15±2.38
	20~30	0.74±0.15	0.70±0.17	1.27±0.02	0.90±0.32	4.98±2.43	5.68±3.30	11.25±0.33	7.30±3.43
	30~50	1.37±0.24	1.25±0.42	2.10±0.07	1.57±0.46	7.00±1.46	5.56±2.08	20.59±2.83	11.05±8.29
	50~70	1.54±0.09	1.27±0.30	2.36±0.08	1.73±0.57	5.94±0.36	4.94±1.62	19.98±3.23	10.29±8.41
	0~70 (全剖面)	6.44±0.46ab	4.58±0.73b	8.42±0.21a	6.48±1.92A	47.35±6.26b	32.55±7.72b	77.28±4.69a	52.39±22.79B
退耕地	0~10	1.89±0.24	1.78±0.31	2.01±0.44	1.89±0.11	26.09±4.69	26.17±7.25	27.79±6.95	26.68±0.96
	10~20	1.41±0.41	1.41±0.27	1.43±0.07	1.42±0.01	21.35±0.94	23.12±6.03	24.31±5.82	22.93±1.49
	20~30	1.08±0.03	1.11±0.22	0.97±0.15	1.05±0.08	20.49±4.79	20.52±4.69	22.94±7.30	21.32±1.41
	30~50	1.95±0.27	1.70±0.20	1.46±0.21	1.70±0.24	36.34±5.15	39.47±13.29	52.66±8.61	39.58±3.16
	50~70	1.59±0.11	1.38±0.30	1.04±0.56	1.34±0.28	23.97±5.12	29.78±13.74	39.08±1.71	20.94±7.62
	0~70 (全剖面)	7.92±0.66a	7.39±0.57a	6.91±0.82a	7.41±0.51A	128.24±11.35a	139.33±21.74a	156.78±15.33a	140.45±12.81A

1) 不同大写字母表示同一土层不同土地利用间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一土地利用类型不同坡位间的差异显著 ($P<0.05$)

2.4 退耕林地和坡耕地土壤碳、氮空间变化特征的影响因素

土壤理化性质与土壤 C、N 养分含量的相关矩阵如图 5 所示，在坡耕地坡面中，土壤 TN 含量和 SOC 含量与土壤 BD、黏粒含量和粉粒含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。土壤 C/N 与土壤 pH 呈显著正相关关系，与土壤 BD、SWC、黏粒含量和粉粒含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量与各土壤理化性质没有显著的相关关系 ($P > 0.05$)。退耕林地土壤 pH 和 BD 与土壤 TN、SOC、 NH_4^+ -N 和 DOC 含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)，与土壤 C/N 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。土壤 NO_3^- -N 含量与 SMC 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。此外，除了土壤 NO_3^- -N 含量与土壤粉粒含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$) 外，其余土壤粒径组成含量与土壤 C、N 组分含量均无明显的相关关系 ($P > 0.05$)。

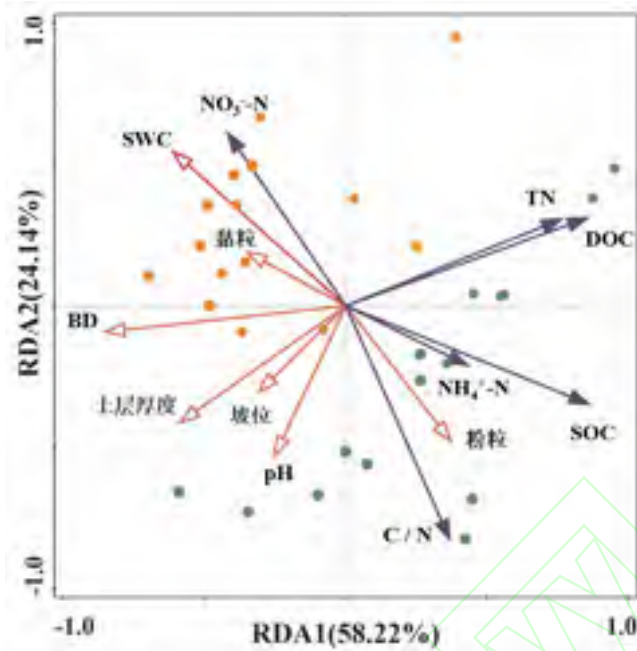


(a) 坡耕地，(b) 退耕林地；数字符号表示：1.pH，2.SWC，3.BD，4.TN，5.SOC，6.C/N，7. NH_4^+ -N，8. NO_3^- -N，9.DOC，10.砂粒含量，11.粉粒含量，12.黏粒含量；圆圈的大小表示相关系数的大小，圆圈的颜色表示相关性的正负，其中蓝色表示正相关，红色表示负相关；*表示显著性水平 $P < 0.05$ ，**表示极显著性水平 $P < 0.01$ ，***表示极显著性水平 $P < 0.001$

图 5 坡面土壤理化性质和 C、N 养分含量的相关性矩阵

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

各环境变量（坡位、土层深度及土壤理化因子：BD、SWC、pH、粉粒和黏粒含量）和各土壤 C、N 组分含量的 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 0.93，第二轴土壤 TN 和 SOC 含量与环境相关性为 0.91，排序结果可靠。RDA1 和 RDA2 解释率分别为 58.2%和 24.1%，两轴共能解释 82.3%的差异信息。通过筛选研究发现，土壤 BD、SWC 和土壤 pH 是影响土壤 C、N 含量变化 3 个主要的环境因子，对土壤 C、N 含量变异的解释度分别为 42.5% ($P < 0.01$)、15.2% ($P < 0.01$) 和 9.0% ($P < 0.01$)。



蓝色箭头表示结果变量，红色箭头表示影响变量，黄色圆点表示坡耕地样本，绿色圆点表示退耕林地样本
图 6 评估 C、N 养分含量与影响因素变量之间关系的冗余分析 (RDA)

Fig. 6 Redundancy analysis assessing (RDA) the relationships of C, N nutrient contents with influential variables

此外，VPA 分析表明（图 7），坡面采样位置（坡位和土层深度）、土壤理化因子（BD、pH、SWC、黏粒、粉粒含量）和土地利用类型转变可以解释土壤 TN 储量 82.7% 的变异[图 7 (a)]和 SOC 储量 93.2% 的变异[图 7 (b)]。其中，坡面采样位置和土壤理化因子是影响土壤 TN 储量的主要因素，分别解释了土壤 TN 储量 2.4% ($P=0.748$) 和 27.9% ($P<0.001$) 的变异，它们的相互作用解释了土壤 TN 储量 47.8% 的变异 ($P<0.001$)。土壤理化因子和土地利用类型对 SOC 含量影响较大，分别解释了 4.8% ($P<0.001$) 和 9.8% ($P<0.001$) 的变异，且 2 个因素的交互作用解释了 69.8% 的变异 ($P<0.05$)。



(a) TN 储量，(b) SOC 储量；土壤理化因子包括：pH、容重、土壤含水量、黏粒含量和粉粒含量；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) 的土壤理化因子和采样位置对土壤 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)

3 讨论

3.1 坡地土壤碳、氮含量空间分布特征的主控因素

一般来说,在重力的影响下,在风力和水力的干预下,土壤颗粒会发生从上坡位向下坡位的物理运动,导致坡面土壤物理和化学性质的空间异质性^[24, 25]。本研究发现,坡位显著影响坡耕地土壤基础理化性质(表 3)和 C、N 养分含量的分布(表 4)。其中土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DOC 含量在下坡位显著高于上坡位。这是因为坡面土壤速效养分易溶于水,且其分布易受到水土流失的影响^[26],在雨滴溅落和径流运移的分离作用下向坡下运移并重新分布^[27, 28]。土壤 TN 和 SOC 含量最低的位置主要集中在坡耕地的中坡位,这一发现与 Li 等^[29]在中国南方红壤丘陵区的研究结果以及 Li 等^[30]在中国黄土丘陵区的研究结果一致。他们通过 ^{137}Cs 的分布来解释这一点,发现中坡位容易遭受更大的土壤侵蚀,并伴随着更高的 SOC 和 TN 损失^[31]。而对于退耕林地而言,土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN 和 SOC 在坡面上的分布差异不大(表 3)。可理解为,除了降雨的总量和冲刷力度外,冠层和地面覆盖物也是土壤侵蚀强度的主要决定因素^[32]。退耕后,林地表层分布着丰富的植被根系和凋落物,这将极大地影响地表径流的形成和流速,阻止养分向斜坡下部迁移和积累^[33]。结果表明,坡地 C、N 养分的分布是植物类型、耕作方式和人类活动等多种因素共同作用的结果,退耕后的林地在一定程度上抵御了坡地土壤侵蚀造成的 C、N 养分重新分配。

同时,研究土壤 C、N 养分含量在剖面的分布特征不仅可以加深对该区域土壤 C、N 迁移转化规律的认识,同时也是估算土壤 C 库和 N 库储量的基础^[34]。影响养分在土壤剖面上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以及土壤颗粒对养分的吸附能力^[35, 36]。结果表明,无论是退耕林地还是坡耕地,土壤 C、N 总养分含量(TN 和 SOC)都随着土壤深度的增加而逐渐降低(图 4)。这是因为土壤表层凋落物和腐殖质的大量积累,加上良好的光照、水分、热量和通风条件,促进了土壤动物和微生物的生长,加速了地表凋落物的分解,导致土壤 TN 和 SOC 在土壤表面富集^[37]。随后,随着水或其他介质的运动和扩散,土壤 C、N 含量的分布格局由表层向下层稳步下降^[38]。坡耕地土壤 NH_4^+ -N 和 DOC 含量随土层深度呈先降低后增加的趋势(图 4),这是因为土壤 NH_4^+ -N 和 DOC 均为土壤 C、N 的有效养分,易溶于水,易被植物吸收利用。随自然降雨入渗到中层后,被农作物根系生长消耗,导致中层土壤 C、N 速效养分低于上、下层土壤^[25]。然而,退耕林地深层土壤 NH_4^+ -N 和 DOC 含量未见明显增加。这是因为树木的根系可以很容易地渗透到更深的土层中并获得养分,该养分是典型的农作物根系所无法获得的^[39]。因此,坡耕地比退耕后的林地更有可能储存深层的 C、N 养分。根据 RDA 分析的结果(图 6),土壤 BD, pH 值和 SWC 也对土壤 C、N 养分含量影响较大。其中土壤 BD 反映了土壤的透气性,在一定程度上影响了微生物的活动与代谢^[40];良好的土壤水分条件有利于植物生长,从而减少土壤及其携带的养分流失,促进养分积累^[41];适宜的 pH 值决定了有机物的溶解度,是土壤有机 C、N 矿化必不可少的条件^[42]。因此三者与坡面土壤 C、N 养分变化的分布密切相关,是影响该研究区域影响 C、N 养分分布与转化的主要理化性质因素。

3.2 退耕还林对紫色土坡地土壤碳、氮含量变化的影响

退耕林地土壤剖面 C、N 养分来源主要是地上部分的植物残体、凋落物以及地下部分的根系分泌物和微生物残体^[43],而坡耕地土壤地上部分的农作物残体一般会随着粮食收获移除。本研究显示退耕 29a 后,坡耕地和退耕林地的土壤 NO_3^- -N 和 DOC 含量仅在个别土层具有明显的差异,整体上退耕后林地土壤剖面速效 C、N 养分含量并未显著增加(图 4),结合坡耕地表层土壤(0~20 cm) NO_3^- -N 含量较高的现象,可以推测施用无机肥料可以大

量补充土壤中的 N 元素, 并抵消作物收获对 N 的去除。与此相反, 退耕林地表层土壤 TN 和 SOC 含量均显著增加, 这与韩新辉等^[44]报道的黄土丘陵区退耕还林 30a 的研究结果一致。一方面, 与农作物相比, 柏树林植物残体等凋落物的数量较多, 因此在表层聚集了较高的 C 和 N 返还量, 使得表层土壤 C 和 N 明显累积^[45]; 另一方面, 造林恢复后, 地表植被可以有效保护表层土壤不受侵蚀, 减少了土壤 C 和 N 的流失^[46]。而人工柏树林的生长需要大量的水分和养分, 且根系分布较深, 中下层土壤的 N 素来源较少, 主要来自地下部分, 从而解释退耕后的林地并未显著增加中下层土壤 TN 含量^[47]。可见有机质的投入和运移是影响土壤 C 库和 N 库恢复的关键因素。

土壤 C/N 是评价土壤质量的重要指标, 它可以通过影响微生物的代谢活动, 进而影响土壤有机质的矿化过程^[48]。一般认为, 当土壤 C/N 处在 15~20 的范围内时, 表明有机质供肥状况较好^[49]。本研究结果显示, 坡耕地土壤不同土层的 C/N 均小于 15, 并且随着土层加深逐渐降低。此时整个土壤剖面 C/N 较低, 微生物在同化 N 的同时, 需要消耗更多的 C, 从而不利于土壤剖面 SOC 的累积^[50]。退耕 29a 后, 退耕林地不同土层土壤 C/N 均显著高于坡耕地, 这源于大量有机物的外源投入, 使得土壤 C 相对充足而土壤 N 消耗较大。相关性分析表明 (图 5), 坡耕地和退耕林地土壤 TN 和 SOC 含量均呈高度正相关关系, 表明土地利用转变过程中土壤 C 和 N 交互作用强烈^[51]。熊杏等^[52]在南方红壤以及张春华等^[53]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 N 和 C 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^[54], 导致 TN 和 SOC 储量在坡面的高低分布也呈现出相同的趋势。

3.3 退耕还林对紫色土坡地土壤碳、氮储量变化的影响

众所周知, 植被恢复带来的生物量增加会影响坡面尺度土壤 C、N 的积累^[55, 56], 而开垦牧场或砍伐森林会使土壤的物理性质退化, 导致更多的土壤 C、N 流失^[57]。由 VPA 分析可知 (图 7), “退耕还林”后土壤 TN 和 SOC 储量变化是一个极其复杂的过程, 同时受到坡面采样位置 (坡位和土层深度)、土壤理化因子 (BD、pH、SWC、黏粒、粉粒含量) 和土地利用类型等多重因素的共同主导。在 0~70 cm 剖面上, 退耕林地土壤 TN 储量 (7.41 t·hm⁻²) 略高于坡耕地 (6.48 t·hm⁻²), 但差异不显著 (表 5)。但整个剖面 (0~70 cm) 上, 坡耕地 (52.39 t·hm⁻²) 和退耕林地 (140.45 t·hm⁻²) 的 SOC 储量之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。由于研究点的土壤母质、土地利用类型和地形位置相同, 我们假设起点造林点的初始土壤 C 和 N 库与农田相同。本研究发现, 退耕还林 29a 后, 表层 (0~20 cm) SOC 储量增加 25.86 t·hm⁻², 年均 SOC 储量率为 0.89 t·hm⁻², 符合 Post 等^[58]报道的“退耕还林”后全球年平均 C 固存率的范围 (< 1.0 t·hm⁻²), 但略高于 Wang 等^[59]之前在紫色土丘陵区的研究结果 (0.67 t·hm⁻²)。说明除了空间异质性和采样密度差异外, 相似两个研究点的 C 固存率差异可能与“退耕还林”的恢复时间有关。随着植被恢复年限的增加, 生态系统趋于稳定, SOC 数量建立和分解的速率更接近于输入速率, 积累速率变慢^[58]。因此, 在同一研究中, 即使在多个测量间隔内, 最大 SOC 积累速率与平均有机碳积累速率之间也存在很大差异^[60]。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也发挥着重要作用^[61], 下一步还应考虑土壤微生物特性, 结合不同地形条件和恢复年限下植被恢复后土壤-植物系统中碳氮动态变化规律, 以明确紫色土丘陵区生态系统土地利用方式对土壤碳氮循环影响的机制。

4 结论

(1) 退耕还林 29a 后, 退耕林地和坡耕地相比, 速效 C、N 养分如 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 DOC 在土壤剖面 (0~70 cm) 的分布除极个别土层外, 整体上基本无显著差异。

(2) 退耕还林仅显著增加了土壤剖面 SOC 的储量, 土壤 TN 储量增加并不显著。其中, 表层 (0~20 cm) SOC 储量增加 $25.86 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 年均 SOC 储量率为 $0.89 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(3) 除土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量外, 其余土壤 C、N 养分分布均受到土层深度的显著影响, 其中土壤 TN 和 SOC 含量呈现随着土层深度加深而降低的趋势; 与坡耕地相比, 退耕林地土壤 C、N 养分含量受到坡面位置的影响较小, 在一定程度上弱化了坡面侵蚀造成的土壤养分的再分配。

(4) 冗余分析 (RDA) 和方差分解分析 (VPA) 结果显示, 退耕还林后土壤 C、N 养分含量变化是一个极其复杂的过程, 不仅受到土壤 BD, SMC 和 pH 值等土壤理化因素的影响, 还受到地形地貌因素的制约。因此, 植被恢复应同时考虑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, 避免不合理的人为扰动, 以维持和促进土壤 C 库和 N 库的积累。

参考文献:

- [1] Liu X, Ma J, Ma Z, *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.
- [2] Wang T, Kang F, Cheng X, *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.
- [3] Wei X R, Shao M A, 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.
- [4] Wang X W, Song C C, Sun X X, *et al.* Soil carbon and nitrogen across wetland types in discontinuous permafrost zone of the Xiao Xing'an Mountains, northeastern China[J]. *Catena*, 2013,**101**:31-37.
- [5] Fu B J, Wang Y F, Lu Y H, *et al.* The effects of land-use combinations on soil erosion: a case study in the Loess Plateau of China[J]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 2009,**33**(6):793-804.
- [6] Crovo O, Aburto F, Albornoz M F, *et al.* Soil type modulates the response of C, N, P stocks and stoichiometry after native forest substitution by exotic plantations[J]. *Catena*, 2021,**197**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104997.
- [7] Deng L, Liu G B, Shanguan 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.
- [8] 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.
- [9] Chang R Y, Jin T T, Lu Y H, *et al.* Soil Carbon and Nitrogen Changes following Afforestation of Marginal Cropland across a Precipitation Gradient in Loess Plateau of China[J]. *Plos one*, 2014,**9**(1), doi:10.1371/journal.pone.0085426.
- [10] Yuan Z X, Jin X M, Guan Q W, *et al.* Converting cropland to plantation decreases soil organic carbon stock and liable fractions in the fertile alluvial plain of eastern China[J]. *Geoderma Regional*, 2021,**24**, doi: 10.1016/j.geodrs.2021.e00356.
- [11] Jia X, Yang Y, Zhang C, *et al.* A state-space analysis of soil organic carbon in China's Loess Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2017,**28**(3):983-993.
- [12] Wang Y, Fu B, Lue Y, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration

-
- at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2011,**85**(1):58-66.
- [13] 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.
- Su Z A, Xiong D H, Zhang J H, *et al.* Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018,(2):42-47.
- [14] 徐波, 朱雪梅, 刘倩, 等. 川中丘陵区不同土地利用方式下土壤养分特征研究——以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站小流域为例[J]. *西南农业学报*, 2011,**24**(2):663-668.
- Xu B, Zhu X M, Liu Q, *et al.* Study on nutrient characteristics of soil under different land utilization types in Hilly Area of Central Sichuan Basin——A case study in the small river valley of Yanting Purple Soil Agricultural Ecosystem Experiment Station[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011,**24**(2):663-668.
- [15] 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. Effect 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.
- [16] 徐曼, 余砾, 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.
- [17] Zhao P, Tang X, 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.
- [18] Xiao Q, Dong Z, Han Y, *et al.* Impact of soil thickness on productivity and nitrate leaching from sloping cropland in the upper Yangtze River Basin[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021,**311**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107266.
- [19] 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.
- [20] Qi Y, Wei W, Li J, *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.
- [21] Valjavec M B, Carni A, Zlindra 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.
- [22] Liu X, Ma J, Ma Z, *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.
- [23] 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.
- [24] Wang N A, Luo J, He S Q, *et al.* Characterizing the rill erosion process from eroded morphology and sediment connectivity on purple soil slope with upslope earthen dike terraces[J]. *Science of the Total Environment*, 2023,**860**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160486.
- [25] Zhang Y, Wei L, Wei X, *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*, 2018,**29**(10):3521-3534.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Li Z, Nie X, Chen X, *et al.* The effects of land use and landscape position on labile organic carbon and carbon management index in red soil hilly region, southern China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015,**12**(3):626-636.
- [30] Li Z, Liu C, Dong Y, *et al.* Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017,**166**:1-9.
- [31] Nie X, Li Z, Huang J, *et al.* Soil organic carbon loss and selective transportation under field simulated rainfall events[J]. *Plos One*, 2014,**9**(8), doi: 10.1371/journal.pone.0105927.
- [32] Hartanto H, Prabhu R, Widayat A, *et al.* Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003,**180**(1-3):361-374.
- [33] 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.
- [34] 方运霆, 莫江明, Brown S, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. *生态学报*, 2004,(1):135-142.
- Fang Y T, Mo J M, Brown S, *et al.* Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan Biosphere Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004,(1):135-142.
- [35] Huang Y, Liu D, An S. Effects of slope aspect on soil nitrogen and microbial properties in the Chinese Loess region[J]. *Catena*, 2015,**125**:135-145.
- [36] Yuan Y, Zhao Z, Niu S, *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.
- [37] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003,**35**(3):453-461.
- [38] Yang Y, Fang J, Tang Y, *et al.* Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2008,**14**(7):1592-1599.
- [39] Shi P, Zhang Y, Li P, *et al.* Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,**652**:505-512.
- [40] 吴丽君, 李卫忠, 薛巍, 等. 桧-柏带状改造对川中丘陵区柏木林土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020,**26**(2):425-432.
- Wu L J, Li W Z, Xue W, *et al.* Effects of *Alnus cremastogyne-Cupressus funebris* strip reform on

-
- soil C:N:P stoichiometry of Cupressus funebris forests in a hilly area of central Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020,**26**(2):425-432.
- [41] Gao G, Tuo D, Han X, *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.
- [42] 高涵, 肖礼, 牛丹, 等. 宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响[J]. 环境科学, 2019,**40**(8):3825-3832.
- Gao H, Xiao L, Niu D, *et al.* Effects of converting farmland into forest and grassland on soil nitrogen component and conversion enzyme activity in the mountainous area of southern Ningxia[J]. Environmental Science, 2019,**40**(8):3825-3832.
- [43] 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.
- [44] 韩新辉, 杨改河, 佟小刚, 等. 黄土丘陵区几种退耕还林地土壤固存碳氮效应[J]. 农业环境科学学报, 2012,**31**(6):1172-1179.
- Han X H, Yang G H, Tong X G, *et al.* Soil carbon and nitrogen sequestration under several different forest lands converted by farmland in Loess Hilly Area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012,**31**(6):1172-1179.
- [45] 郭胜利, 马玉红, 车升国, 等. 黄土区人工与天然植被对凋落物量和土壤有机碳变化的影响[J]. 林业科学, 2009,**45**(10):14-18.
- Guo S L, Ma Y H, Che S G, *et al.* Effects of artificial and natural vegetations on litter production and soil organic carbon change in Loess Hilly Areas[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009,**45**(10):14-18.
- [46] 姜娜, 邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. 农业工程学报, 2011,**27**(6):36-41.
- Jiang N, Shao M A. Characteristics of soil and water loss of different slope land uses in small watershed on the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011,**27**(6):36-41.
- [47] 陈懂懂, 李奇, 邹小艳, 等. 青海湖农场退耕还林草后的土壤碳氮变化[J]. 草地学报, 2014,**22**(3):469-474.
- Chen D D, Li Q, Zou X Y, *et al.* How did soil organic carbon and total nitrogen change after “Grain for Green” in the Qing-Hai Lake farm[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014,**22**(3):469-474.
- [48] 赵发珠, 韩新辉, 杨改河, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳、氮密度变化特征[J]. 水土保持研究, 2012,**19**(4):43-47.
- Zhao F Z, Han X H, Yang G H, *et al.* Change characteristics of density of soil organic carbon and nitrogen under land shifted into forestland in Hilly Loess Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,**19**(4):43-47.
- [49] Mazzarino M J, Bertiller M B, Sain C, *et al.* Soil nitrogen dynamics in northeastern Patagonia steppe under different precipitation regimes[J]. Plant and Soil, 1998,**202**(1):125-131.
- [50] 任书杰, 曹明奎, 陶波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. 地理科学进

-
- 展, 2006,(4):58-67.
- Ren S J, Cao M K, Tao B, *et al.* The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: a review[J]. *Progress in Geography*, 2006,(4):58-67.
- [51] Han X, Gao G, Chang R, *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.
- [52] 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.
- [53] 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 Bel[J]. *Environmental Science*, 2011,**32**(5):1407-1414.
- [54] 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 Fertilizers*, 2015,**21**(1):112-120.
- [55] Chen S, Wang W, Xu W, *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.
- [56] Jia X, Yang Y, Zhang C, *et al.* A state-space analysis of soil organic carbon in China's Loess Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2017,**28**(3):983-993.
- [57] Celik I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005,**83**(2):270-277.
- [58] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000,**6**(3):317-327.
- [59] Wang X, Zhou M, Li T, *et al.* Land use change effects on ecosystem carbon budget in the Sichuan Basin of Southwest China: Conversion of cropland to forest ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,**609**:556-562.
- [60] 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.
- [61] Hu C, Fu B, Liu G, *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.