

DOI: 10.11766/trxb201508220172

# 近30年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素\*

罗由林<sup>1, 2</sup> 李启权<sup>1, 2†</sup> 王昌全<sup>1</sup> 付月君<sup>1</sup> 辛志远<sup>1</sup> 李冰<sup>1</sup> 袁大刚<sup>1</sup>

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

(2 四川农业大学资源与地理信息技术研究所, 成都 611130)

**摘要** 基于1981年全国第二次土壤普查数据和2012年555个表层土壤实测数据, 探讨近30年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变特征及其驱动力。运用方差分析和回归分析对比了地形、成土母质、土壤类型、土地利用方式、植被对土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)时空演变的影响。结果表明研究区1981年和2012年表层SOC含量上升110%, TN含量上升27.27%, 变异系数均呈下降趋势。近30年来, SOC、TN由于受结构性因素和随机性因素共同影响变为更倾向于受随机性因素的影响, 时空演变上大部分区域SOC、TN含量均有增加。近30年来土地利用方式对研究区SOC、TN时空变异的影响增强并成为主导因素, 土壤类型的影响下降, 地形因子的影响程度大幅下降而植被贡献率上升。全区碳氮含量及碳氮比值上升, 碳氮之间的相关系数有所下降。

**关键词** 土壤有机碳; 全氮; 时空演变; 驱动力; 川中紫色丘陵区

**中图分类号** S151.9; S154.1 **文献标识码** A

土壤有机碳和全氮是植物生长必需营养元素的主要来源, 也是陆地土壤碳库和氮库的重要组成部分, 在一定程度上影响着大气中温室气体的浓度和全球气候变化<sup>[1-2]</sup>, 已成为近年来全球气候变化背景下关注的焦点之一。由于地表条件及人为活动差异, 不同地表环境因素对土壤性质的时空演变作用存在着明显差异, 导致土壤碳氮存在着明显的区域效应和尺度效应<sup>[3-4]</sup>。这种区域效应和尺度效应不仅是农田精准施肥管理的基础, 也是引起区域碳、氮迁移转化不确定性的一个重要因素。因而, 研究碳氮时空演变特征及影响因素动态变化趋势, 对于掌握和调控区域土壤碳、氮的关键因子以及全球碳氮循环研究有着重要作用。

国内外已有学者运用地统计等方法探讨不同区域土壤碳氮的空间变异特征及其影响因素, 取得了

一定的研究成果。在众多的影响因素中, 结构性因素如成土母质<sup>[5]</sup>、土壤类型<sup>[6]</sup>、植被<sup>[7]</sup>、地形条件<sup>[8]</sup>及诸如土地利用方式、耕作管理措施<sup>[9]</sup>等随机性因素对土壤碳氮时空分布有明显影响<sup>[10-11]</sup>。但综合各影响因素系统地探讨其对碳氮时空变异影响的研究较少; 而且量化不同因素对区域土壤碳氮时空分布特征的影响程度, 将更有利于理解区域土壤碳氮时空演变格局的形成和更精确地指导区域碳氮调控和生态环境保护。

近几十年来中国土地利用变化剧烈, 无论是土地利用结构的变化还是农地面积的变化等, 均将诱发区域和国家尺度土壤碳氮的剧烈改变<sup>[9, 12]</sup>, 而由此引起的区域差异也将会更为明显。川中紫色丘陵区地处四川盆地西南部, 土壤除少量第四系老冲积物外, 多由紫色砂、页岩发育而来, 人口密集,

\* 国家自然科学基金项目(4120124)和四川省科技支撑计划项目(2012JZ0003)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 4120124) and the Key Project of Science and Technology Plan of Sichuan Province of China (No. 2012JZ0003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liqq@reis.ac.cn

作者简介: 罗由林(1990—), 男, 四川乐山人, 硕士研究生, 研究方向为土壤资源环境。E-mail: S20132717@163.com

收稿日期: 2015-08-22; 收到修改稿日期: 2015-11-06

土地垦殖率高，是四川省典型的丘陵农耕区和长江上游水土流失重点防治区<sup>[11, 13]</sup>。本研究以川中丘陵第一大县仁寿县为案例区，通过对1981年全国第二次土壤普查数据整理和2012年野外实地采样，结合成土母质、地形因子、土壤类型、植被盖度、土地利用方式，系统地探究近30年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变特征及其影响因子的变化趋势，以期为该区土壤碳氮管理及碳氮时空动态变化高精度模拟预测提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省中部地区（图1），地理坐标介于N29°37′~30°20′和E103°54′~104°29′之

间，面积2 606 km<sup>2</sup>，人口162万，辖22个镇、38个乡镇，是四川省第一大县，人口密集，土地利用程度高。地貌以中、浅切割丘陵为主，包括部分低山区域（图1 b）；海拔在345~972 m之间。县域处于亚热带季风湿润气候区，四季分明，温暖湿润；年均气温17.4℃，年均降雨量1 009 mm，年均日照时数1196 h，无霜期312 d。成土母质以侏罗系紫色砂页岩为主，包含白垩系、三叠系紫色砂页岩和第四系老冲积物共4种母质类型。土壤类型主要有紫色土、水稻土和黄壤3种。土地利用方式主要以水田、旱地、林草地、园地为主。自20世纪50年代以来，林木大量被砍伐，自然植被大量减少，20世纪80年代全县森林覆盖率仅4.70%；至21世纪初森林覆盖率恢复达到19.96%，原生植被稀少，植被以针、阔叶林等次生植被为主。

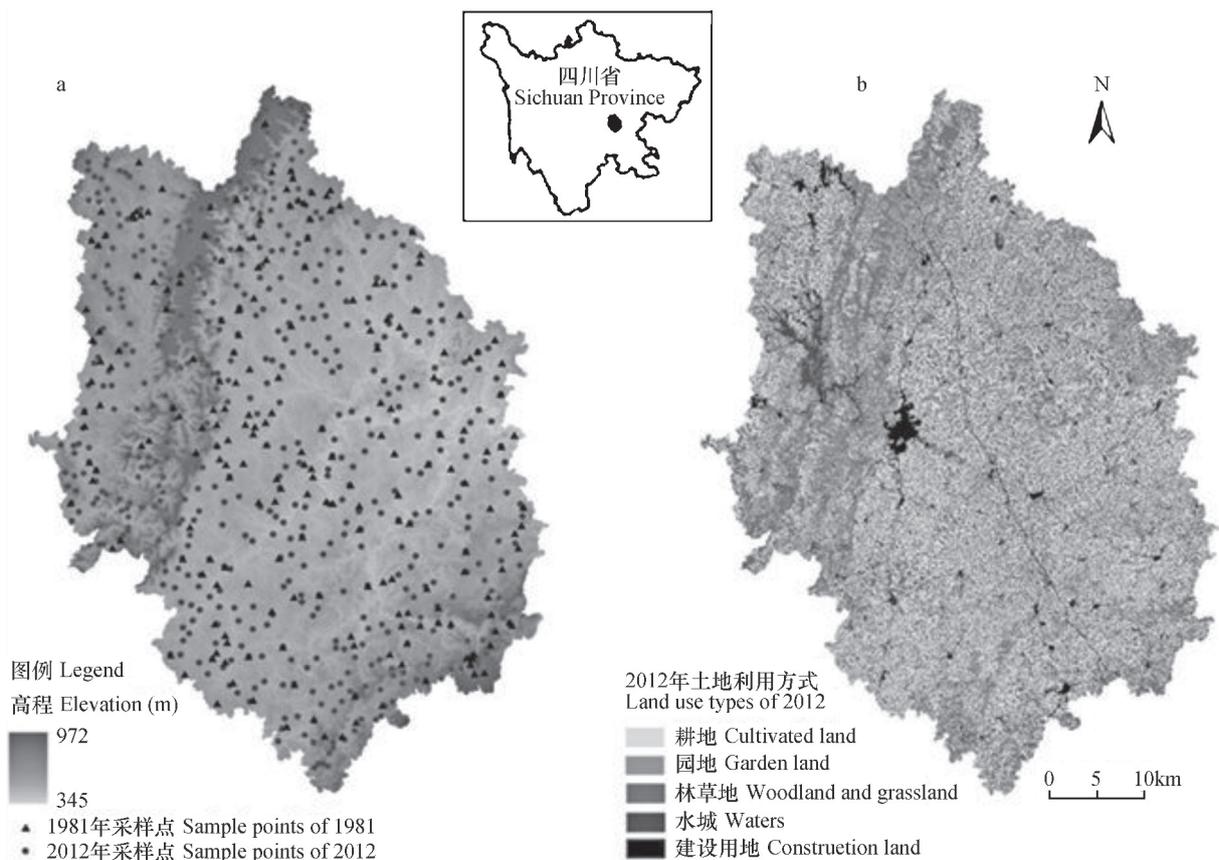


图1 研究区样点分布图和土地利用图

Fig. 1 Distribution map of soil sampling sites and land use types of 2012

### 1.2 土壤普查数据

研究区1981年土壤有机碳、全氮数据来自全国第二次土壤普查时采集的典型土壤剖面。这些典型土壤剖面数据资料记录在《四川土壤》、《仁寿土

壤》等相关地方性资料中。每一个剖面均较详细地记录了该土壤剖面的采样地点、成土母质、地形特征、土壤类型、土地利用方式以及土壤理化性质等信息。本研究通过收集整理这些资料，建立了该区

第二次全国土壤普查的典型土壤剖面数据库,并结合行政区划、居民点空间分布数据、土壤类型图、母质图、植被类型图、30 m分辨率DEM和1:1万地形图等辅助资料对各剖面点位置逐一进行了定位<sup>[14]</sup>,尽可能使各土壤剖面的位置接近原采样点位置,同时使定位处的环境条件符合各土壤剖面记录的环境信息;共整理获得214个位置信息相对准确的典型剖面。

### 1.3 样品采集与分析

根据研究区的实际情况,在考虑样点代表性与空间分布均匀性的基础上,结合研究区成土母质、土壤类型和土地利用方式等资料进行采样点布设,并于2012年11—12月在全县采集表层(0~20 cm)土壤样点558个(图1 a)。每一采样点周围5 m范围内取4个点,混合后以四分法取样。同时记录每个采样点的地理坐标、海拔、成土母质、土壤类型、土地利用方式、种植制度和施肥状况等地表环境信息。土壤样品在室内自然风干后,去除石砾和根系等杂物,分别研磨过2 mm和0.149 mm尼龙筛。采用重铬酸钾法测定土壤有机碳(SOC)含量<sup>[15]</sup>,Foss Kjeltec8400全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮(TN)含量。

### 1.4 数据处理

土壤样点数据及所有基础图件均统一到相同的平面投影坐标系统。参照国内外相关研究成果<sup>[16-17]</sup>,基于研究区30 m分辨率的DEM数据,本文初步选择9个地形指标用以反映研究区地形特点,包括高程(DEM)、相对高程( $H_r$ )、坡度( $S$ )、坡向(Aspect)、坡长(LS)垂直曲率( $C_v$ )、水平曲率( $C_h$ )、地形湿度指数( $\Psi$ ,  $\Psi = \ln(CA/LS)$ , CA表示汇流面积)、河流动能指数( $\Omega$ ),各地形因子具体计算方法参见文献<sup>[16]</sup>。其中地形湿度指数( $\Psi$ )、河流动能指数( $\Omega$ )、坡度( $S$ )、坡长(LS)因子对地表径流、植物的生长和分布等水文、生态过程产生影响,进而影响土壤特性空间分布<sup>[17]</sup>;坡向(Aspect)采用其余弦值以表达其南北变化。归一化植被指数(NDVI)是最常用的反映植被覆盖的植被指数,在ArcGIS 9.3软件中提取生成得到。

受点位异常环境因素影响,个别样点可能出现极端异常值,从而掩盖土壤碳氮与环境因素间的普遍关系,研究中采用均值加减3倍标准差的方法,在4种土地利用方式下(水田、旱地、园地、林草

地)进行异常样点的识别和剔除,得到1981年的214个和2012年的555个土壤样点数据用于时空变异特征分析。其中2012年SOC、TN部分数据引自文献<sup>[11]</sup>、<sup>[13]</sup>。经典统计分析、相关分析、方差分析以及回归分析均在SPSS20软件中完成;成土母质、土壤类型及土地利用方式为定性分类变量,研究中采用虚拟变量<sup>[13]</sup>进行赋值实现回归分析。运用地统计学方法进行空间结构分析,其中半方差函数的计算及拟合模型在GS+ 7.0上进行;空间插值在ArcGIS9.3软件平台上进行,其中时空变化图通过将两个年代的空间分布图转换为栅格图像后,利用栅格计算器功能实现。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤碳氮统计特征

统计结果显示,研究区1981年SOC含量在0.70~21.17 g kg<sup>-1</sup>之间,均值为6.41 g kg<sup>-1</sup>,按照全国第二次土壤普查分级标准,总体属于中等偏下水平,变异系数为72.59%,接近强空间变异性;TN含量在0.20~1.91 g kg<sup>-1</sup>之间,均值为0.88 g kg<sup>-1</sup>,属于较缺乏水平,变异系数为40.04%,属中等程度的空间变异性。2012年SOC、TN含量分别在3.36~37.10 g kg<sup>-1</sup>和0.34~2.57 g kg<sup>-1</sup>之间,均值分别为13.46 g kg<sup>-1</sup>和1.12 g kg<sup>-1</sup>,均低于全国平均水平(SOC: 15.73 g kg<sup>-1</sup>; TN: 1.54 g kg<sup>-1</sup>),变异系数分别为48.87%、38.75%,均属于中等程度的空间变异性<sup>[11, 13]</sup>。K-S检验显示(表1),研究区SOC、TN呈对数正态分布,本研究采用其对数转换值进行方差分析和回归分析。

### 2.2 土壤碳氮时空演变格局

半方差分析能够反映出土壤碳氮的空间结构特征,其中结构性因素主要是指土壤在形成过程中诸如成土母质类型、土壤类型、地形条件等,随机性因素则是指诸如土地利用方式等能在一定程度上反映耕作活动、种植制度、投入管理水平差异的人为活动因素;结构性因素使得土壤属性具有空间自相关性,而随机性因素则会减弱土壤属性的空间自相关性,增大其异质性。从半方差拟合结果来看(表2,其中部分数据引自文献<sup>[11]</sup>、<sup>[13]</sup>),研究区SOC、TN均符合指数模型,1981年和2012年SOC、TN的拟合系数分别为0.760、0.819和0.706、0.791,残差输出小,块金值分别为0.280、

表1 研究区土壤有机碳、全氮统计特征

**Table 1** Descriptive statistics of SOC and TN in the studied area

指标	年代	样点数	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数	峰度系数	偏度系数
Index	Year	Numbers	Max (g kg <sup>-1</sup> )	Min (g kg <sup>-1</sup> )	Mean (g kg <sup>-1</sup> )	SD	CV (%)	Skewness	Kurtosis
有机碳	1981	214	21.17	0.70	6.41	4.65	72.59	0.74	1.25
SOC	2012	555	37.10	3.36	13.46	6.58	48.87	0.50	1.02
全氮	1981	214	1.91	0.20	0.88	0.35	40.04	-0.03	0.76
TN	2012	555	2.57	0.34	1.12	0.44	38.75	0.11	0.78
碳氮比	1981	214	13.73	0.97	6.85	2.94	42.92	0.24	-0.61
C/N	2012	555	21.79	4.84	11.93	3.14	26.32	0.38	-0.23

表2 研究区土壤有机碳、全氮半方差函数模型及其参数

**Table 2** Theoretical semivariogram model for SOC and TN in the studied area and its parameters

指标	年代	理论模型	块金值	基台值	块金效应	变程	决定系数	残差
Index	Year	Theoretical model	Nugget	Sill	Nugget/Sill	Range (km)	R <sup>2</sup>	Residual
有机碳	1981	指数 Exponential	0.280	0.560	0.500	9.0	0.760	2.34 × 10 <sup>-2</sup>
SOC	2012	指数 Exponential	0.150	0.225	0.667	8.0	0.819	1.42 × 10 <sup>-3</sup>
全氮	1981	指数 Exponential	0.070	0.167	0.419	12.0	0.706	4.03 × 10 <sup>-3</sup>
TN	2012	指数 Exponential	0.090	0.148	0.608	9.5	0.791	6.69 × 10 <sup>-4</sup>

0.150和0.070、0.090，表明存在着由系统误差和随机误差引起的不同程度的空间变异；块金效应分别为0.500、0.419和0.667、0.608；两个时期SOC、TN的自相关距离分别为9.0 km、8.0 km和12.0 km、9.5 km，空间自相关范围较小，与川中丘陵其他相关研究空间自相关范围接近<sup>[11, 18]</sup>。反映出1981年SOC、TN的空间变异主要受到结构性因素和随机性因素的共同影响，至2012年则更倾向于受随机性因素影响。

为直观反映土壤有机碳和全氮的空间分布格局，运用半方差拟合模型及其参数，在ArcGIS9.3软件平台利用普通克里格法（Ordinary kriging）实现空间插值，得到研究区的SOC和TN时空分布图（图2）。1981年该区SOC在空间分布上表现为东北低，西南高，大部分区域SOC含量在3~9 g kg<sup>-1</sup>，SOC含量水平普遍偏低；2012年该区SOC高值区主要位于西北部低山地区和东南部深丘区域，低值区则主要位于中部浅丘，SOC含量在12~18 g kg<sup>-1</sup>之间的区域面积分布最广，与统计结果一致。从变化情况看，30年来全区大部分区域SOC含量增加6~9 g kg<sup>-1</sup>，西北低山区和东北浅丘区大部分区域土壤有机碳含量增加9~12 g kg<sup>-1</sup>；中部浅丘区域SOC

含量增幅较小，极小部分地区SOC含量有所下降。

1981年大部分区域TN含量在0.50~0.75 g kg<sup>-1</sup>，低值区主要分布在东部及南部地区和部分西部地区，高值区主要散布于中部、北部部分地区；2012年大部分区域TN含量在0.75~1.25 g kg<sup>-1</sup>之间，呈现北高南低，且多呈斑块状分布的格局。总体来看，1981年—2012年该区大部分地区TN增加0~0.25 g kg<sup>-1</sup>，其中东南深丘大部分土壤TN含量增加显著，达到0.25~0.50 g kg<sup>-1</sup>，东部浅丘等地TN含量增幅达到0.50~0.75 g kg<sup>-1</sup>，而中部丘陵部分地区TN含量有所下降。该区土壤有机碳、全氮时空演变格局与其植被条件和土地利用方式等密切相关<sup>[11, 13]</sup>，其西北低山区和东南深丘区植被条件较好，土地利用方式多为林草地和园地，东部浅丘多水田分布，均利于碳氮积累，进而呈现出这种时空演变特征。

## 2.3 土壤碳氮时空变化的驱动因素

### 2.3.1 母质和土壤类型

不同成土母质SOC、TN含量统计结果显示（表3）：相比于1981年，2012年不同成土母质SOC、TN含量均有较大提高，表现为第四系老冲积物、白垩系、侏罗系、三叠系SOC含量分别提高1.69倍、2.15倍、2.10倍、

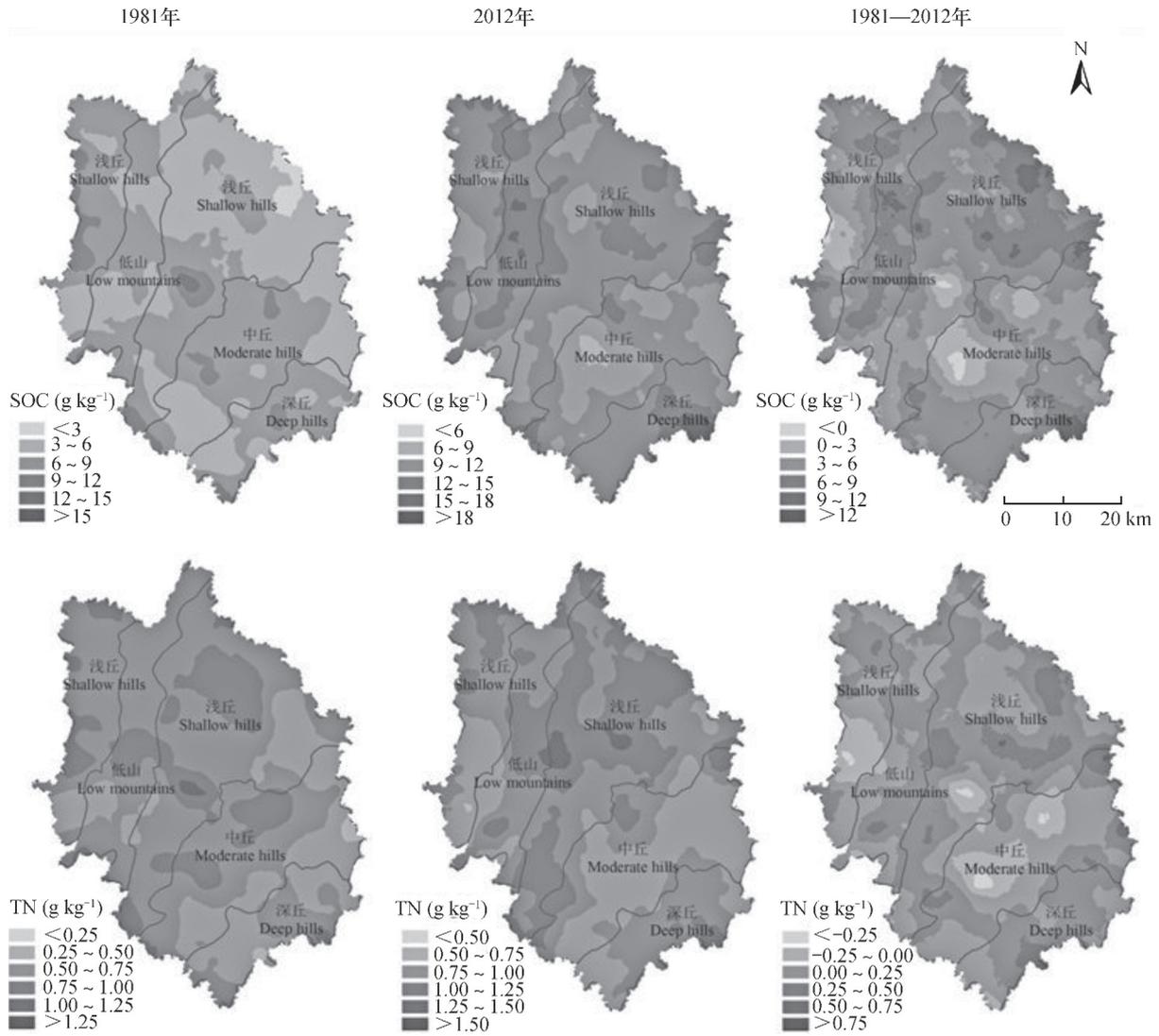


图2 研究区土壤有机碳、全氮时空变化分布图

Fig.2 Spatio-temporal distribution of SOC and TN in the studied area

2.65倍，TN含量分别提高1.20倍、1.20倍、1.31倍、1.33倍。1981年各成土母质之间土壤有机碳含量没有显著差异，2012年三叠系紫色岩SOC含量与白垩系紫色岩SOC含量已达到显著差异水平；1981年和2012年各成土母质TN含量之间均无显著性差异。从变异系数来看，近30年来，除三叠系外，第四系老冲积物与各紫色岩SOC含量的变异系数总体上有所下降，各成土母质TN变异系数均呈下降趋势；SOC、TN空间自相关性降低。

从不同土壤类型SOC、TN含量来看（表4），1981年和2012年SOC、TN含量均表现为水稻土 > 黄壤 > 紫色土，3种土壤类型SOC、TN含量总体均呈现上升趋势。这主要与3种土壤自身特性有关，

水稻土作为人为土，有机碳易于积累且碳氮之间存在较好的相关性；黄壤多由老冲积物发育而来，土壤性质较稳定；紫色土作为初育土，变化剧烈，自身碳氮养分较为缺乏且易于损失。1981年和2012年水稻土SOC、TN含量均显著高于黄壤、紫色土有机碳含量，30年来紫色土、黄壤、水稻土SOC、TN含量分别增长约2.98倍、2.39倍、1.64倍和1.34倍、1.37倍、1.22倍；紫色土增幅最高，显示出紫色土在人为耕作管理下SOC含量有一定提升潜力。变异系数方面，30年来紫色土、黄壤SOC、TN含量变异系数均有不同程度的上升，水稻土SOC、TN变异系数降幅较大，反映出人为耕作管理降低了水稻土SOC、TN的空间变异性。

表3 不同成土母质土壤有机碳、全氮含量统计特征

Table 3 Descriptive statistics of SOC and TN contents relative to soil parent material

年代 Year	成土母质 Soil parent materials	样点数 Numbers	有机碳 SOC			全氮 TN		
			均值 Mean (g kg <sup>-1</sup> )	标准差 SD	CV (%)	均值 Mean (g kg <sup>-1</sup> )	标准差 SD	CV (%)
1981	第四系老冲积物 Q <sub>2</sub> alluvial deposits	17	7.94a	4.17	52.55	0.91a	0.32	34.78
	白垩系紫色岩 K <sub>1</sub> purple shale	33	5.85a	5.14	87.88	0.87a	0.39	44.69
	侏罗系紫色岩 J <sub>1, 2, 3</sub> purple shale	151	6.41a	4.75	74.07	0.88a	0.35	39.92
	三叠系紫色岩 T <sub>3</sub> purple shale	13	5.75a	1.88	32.78	0.80a	0.26	32.83
	第四系老冲积物 Q <sub>2</sub> alluvial deposits	44	13.46ab	4.43	32.91	1.09a	0.26	23.84
2012	白垩系紫色岩 K <sub>1</sub> purple shale	68	12.60b	6.60	52.36	1.04a	0.46	43.76
	侏罗系紫色岩 J <sub>1, 2, 3</sub> purple shale	404	13.44ab	6.76	50.34	1.15a	0.45	39.52
	三叠系紫色岩 T <sub>3</sub> purple shale	39	15.26a	6.50	42.63	1.06a	0.34	32.41

注：表中相同字母表示同一时期二者之间无显著性差异，不同字母表示同一时期二者之间有显著性差异，下同Note: Data affixed with the same letters are not significant in difference within same year, and data affixed with different letters are significant in difference within same year. The same below

表4 不同土壤类型土壤有机碳、全氮含量统计特征

Table 4 Descriptive statistics of SOC and TN contents relative to soil type

年代 Year	土壤类型 Soil types	样点数 Numbers	有机碳 SOC			全氮 TN		
			均值 Mean (g kg <sup>-1</sup> )	标准差 SD	CV (%)	均值 Mean (g kg <sup>-1</sup> )	标准差 SD	CV (%)
1981	紫色土 Purplish soils	111	3.78b	1.99	52.54	0.73b	0.21	29.38
	黄壤 Yellow soils	23	5.00b	2.03	40.59	0.65b	0.15	23.60
	水稻土 Paddy soils	80	10.45a	4.98	47.71	1.15a	0.37	31.99
2012	紫色土 Purplish soils	293	11.25b	6.41	56.97	0.98b	0.41	41.74
	黄壤 Yellow soils	59	11.93b	5.67	47.54	0.89b	0.25	28.56
	水稻土 Paddy soils	203	17.10a	5.39	31.51	1.40a	0.37	26.23

**2.3.2 地形条件和植被覆盖** 因两个时期土壤样点数不同，文中仅分析其显著、极显著性关系，不比较相关系数的变化。相关分析显示（表5），1981年和2012年SOC与高程相关系数均未达到显著性相关关系（ $p > 0.05$ ）。1981年SOC与坡度、河流动能指数分别达到显著（ $p < 0.05$ ）、极显著

（ $p < 0.01$ ）负相关水平，表明SOC含量随着坡度的减小和河流冲刷力的减弱而呈现增加趋势。1981年和2012年SOC含量与地形湿度指数的相关系数均达到极显著正相关水平，表明随着地势低洼SOC含量升高。1981年和2012年SOC含量与植被覆盖指数的相关系数达到极显著正相关关系，反映出植被覆

表5 土壤有机碳、全氮与地形因子及植被盖度之间的相关关系

Table 5 Correlation analysis of SOC and TN with topography and vegetation cover

指标	年代	样点数	高程	相对高度	坡长	坡向	坡度	剖曲曲率	平面曲率	地形湿度指数	河流动能指数	植被盖度
Index	Year	Numbers	DEM	$H_r$	$L_s$	Aspect	$S$	$C_v$	$C_h$	$\Psi$	$\Omega$	NDVI
有机碳	1981	214	-0.030	-0.071	0.071	0.081	-0.204**	-0.097	0.025	0.412**	-0.134 <sup>△</sup>	0.304**
SOC	2012	555	0.047	-0.045	0.058	0.133**	-0.011	-0.003	-0.014	0.173**	-0.045	0.269**
全氮	1981	214	-0.064	-0.061	0.090	0.030	-0.181**	-0.041	0.102	0.375**	-0.121	0.222**
TN	2012	555	0.009	-0.022	0.052	0.153**	-0.070	-0.033	0.004	0.226**	-0.054	0.214**

\*  $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$ 

盖率越高其SOC含量也越高<sup>[8]</sup>。TN含量随着坡度增加而降低；TN与地形湿度、植被覆盖指数的相关系数呈极显著正相关关系。主要是坡度越大区域的土壤受到的冲刷侵蚀越严重，土壤养分易流失，地势低洼处氮素易随地表物质积聚，植被覆盖率越高，有机碳越易积累，而有机碳与氮素之间存在着较好的相关性<sup>[19, 20]</sup>，进而导致TN含量较高。2012年TN与坡向、地形湿度指数、植被指数相关系数达到极显著正相关关系；表明随着坡向转北（阴坡），阴坡植被越茂盛，水分越多，氮素更易于积累<sup>[11]</sup>。

30年来，坡向对SOC、TN含量影响由不显著加强为极显著性正相关水平，坡度对SOC、TN含量影响由极显著负相关减弱为无显著相关性，SOC含量与河流动能指数之间由极显著负相关关系减弱为无显著相关性关系，这在一定程度上反映出该区水土流失作用已减弱。

**2.3.3 土地利用方式** 不同土地利用方式下SOC、TN含量差异明显（表6）。1981年SOC含量

表现为水田显著高于林草地，且后者显著高于旱地、园地；TN含量表现为水田显著高于林草地、旱地、园地。至2012年不同土地利用SOC、TN含量均呈现出显著性差异，表现为：水田 > 林草地 > 园地 > 旱地，水田的SOC、TN含量一直处于最高水平，这与水田氮肥施用量大且其厌氧环境有利于SOC储存有关<sup>[15, 19]</sup>；林草地碳氮来源主要为植物凋落物，枯落物归还量大，表层SOC输入较多，且林地土壤碳氮之间有较好的相关性<sup>[19, 20]</sup>，因而其SOC、TN处于较高水平。旱地的熟制多为一年两熟或三熟，园地主要为果园，氮肥投入虽较多，但旱地和果园通气条件较好，耕层有机质分解较快，氮素流失相对容易，使其SOC、TN含量处于相对较低的水平<sup>[21]</sup>。

30年来SOC含量的增幅明显高于TN含量增幅；表现为水田、旱地、园地、林草地SOC含量分别提升1.64倍、2.10倍、2.71倍、2.53倍，TN含量分别提升1.22倍、1.13倍、1.25倍、1.55倍，林草地、园地SOC、TN增幅最为明显。其中，园地与旱

表6 不同土地利用方式土壤有机碳、全氮统计特征

Table 6 Descriptive statistics of SOC and TN contents relative to land use type

年代	土地利用方式	样点数	有机碳 SOC			全氮 TN		
			均值 Mean ( $\text{g kg}^{-1}$ )	标准差 SD	CV (%)	均值 Mean ( $\text{g kg}^{-1}$ )	标准差 SD	CV (%)
Year	Land use types	Numbers						
1981	水田 Paddy field	80	10.45a	4.98	47.71	1.15a	0.37	31.99
	旱地 Dry land	105	3.69c	1.76	47.63	0.70b	0.20	29.01
	园地 Garden land	14	3.83c	1.72	44.90	0.77b	0.22	28.53
	林草地 Woodland and grassland	15	6.26b	2.76	44.11	0.74b	0.21	28.40
2012	水田 Paddy field	203	17.10a	5.39	31.51	1.40a	0.37	26.23
	旱地 Dry land	154	7.74d	2.03	26.19	0.79d	0.20	25.55
	园地 Garden land	60	10.38c	3.20	30.81	0.96c	0.32	32.91
	林草地 Woodland and grassland	138	15.84b	7.55	47.65	1.15b	0.48	41.46

地之间SOC、TN含量均出现显著性差异；林草地、园地SOC、TN储存能力大幅提升。

变异系数方面，2个时期不同土地利用方式SOC、TN均表现为中等程度的空间变异。相比于1981年，2012年林草地SOC变异系数有所升高，水田、旱地、园地SOC变异系数均有不同程度下降；TN则表现为林草地、园地变异系数上升，水田、旱地变异系数下降。反映出自然植被会增加SOC、TN的空间自相关性，而耕作活动降低了研究区SOC、TN的空间变异程度，这与省域和国家等尺度上的规律一致<sup>[22-24]</sup>。

**2.3.4 影响因素的变化** 为揭示近30年来各因素对区域SOC、TN时空演变影响程度的变化，对各影响因素进行回归分析。结果显示，成土母质对SOC、TN时空演变格局无显著影响 ( $p > 0.05$ )，这主要与研究区成土母质主要为紫色砂、页岩，其岩性总体较为相似有关<sup>[13]</sup>。土壤类型、土地利用方式、植被覆盖、地形因子对SOC、TN时空变异均有极显著影响 ( $p < 0.001$ )。1981年土壤类型、土地利用方式、植被覆盖、地形因子可分别影响SOC空间变异的43.0%、42.9%、8.8%、17.2%，TN空间变异的31.9%、31.3%、4.5%、14.8%；2012年可分别影响SOC空间变异的23.7%、47.8%、7.1%、5.4%，TN空间变异的26.5%、35.6%、4.4%、8.2%。1981年土壤类型和土地利用方式共同主导着SOC、TN的空间变异，2012年土地利用方式对SOC、TN的影响远高于土壤类型等因素，已成为该区SOC、TN时空变异的主控因素，这与空间结构分析的结论一致。1981年地形因子对SOC、TN空间变异的影响分别为植被盖度的1.96倍和3.29倍，至2012年分别为植被盖度的0.76倍和1.86倍，地形因子对SOC、TN时空变异的影响明显下降而植被盖度的影响相对上升。

土地利用方式在近30年来对SOC、TN的时空变化的影响增大，反映出人为耕作活动对SOC、TN时空变异的影响程度正日益加大，已经成为川中丘陵区土壤碳、氮时空演变的主控因素；地形因子的影响下降，这在一定程度上也反映出了近30年来人类活动对地形条件的改造作用和土地垦殖率的提高<sup>[25]</sup>。该区SOC、TN的时空变异特征（图2）也与土地利用方式（图1）基本吻合，表现为西北低山区和东南深丘区SOC、TN上升明显而在中丘、浅丘SOC、TN增幅较小（图2）；主要是西北低山区和

东南浅丘区林草地分布面积较大（图1）且多由旱地转变而来，林草地SOC与TN之间存在较好的相关性<sup>[19, 21]</sup>，中部地区多为耕地而林草地分布极少，进而形成了这种时空演变格局（图2）；同时植被盖度对SOC、TN空间变异特征的影响作用上升，反映出植被恢复对碳氮储存的效果明显，也是土地利用方式控制着区域SOC、TN的时空演变的一种体现。

## 2.4 土壤碳氮变化的环境意义

土壤碳氮比（C/N）既是土壤质量的敏感指标，也是衡量土壤C、N营养平衡状况的指标<sup>[3]</sup>。与仅考虑土壤碳氮本身的变异特点相比<sup>[26-28]</sup>，土壤碳氮之间的比例关系更能全面地阐述土壤碳氮变化的特点<sup>[21]</sup>。研究区2012年SOC含量变为1981年的2.10倍，TN含量变为1981年的1.27倍；其碳氮比值（C/N）由6.96上升至11.93，变异系数大幅下降（表1）。这与红壤丘陵区有机质和全氮均有较大幅度提高而C/N却明显降低<sup>[29]</sup>的结果不同。主要是红壤丘陵区1980—2002年间SOC含量增幅约为21.92%，TN含量增幅约为31.92%，其TN含量的增加幅度大于SOC含量；而川中丘陵区1981—2012年30年间SOC含量增幅109.98%，TN含量增幅为27.27%，SOC含量增幅远高于TN含量；进而导致两个地区在SOC、TN含量均大幅增加的情况下，红壤丘陵区C/N下降而川中紫色丘陵区C/N上升。

土壤C/N提高可对土壤微生物的活动能力产生一定的限制作用，促使有机质和有机氮的分解矿化速度减慢，提高土壤固定有机碳的能力。土壤氮素多以有机氮的形式存在于有机质中，在绝大多数情况下SOC与TN之间存在较高的相关性<sup>[19, 21]</sup>，30年来该区C/N上升，碳氮间的相关系数由0.71降为0.68<sup>[30]</sup>；这与该区农业生产发展密切相关，据《四川省农业统计年鉴》数据显示1982年该区化学纯氮施入量20 886 t，2009年为23 169 t，其施氮量呈现出上升趋势。

川中丘陵区人口较为密集，随着土地垦殖系数的提高，化学氮肥等的施用量增加，逐渐改变了土壤中的碳氮比例关系。与松嫩平原C/N上升的同时碳氮相关系数上升不同<sup>[31]</sup>，该区碳氮之间相关系数下降，反映出在碳氮比一定的情况下，若继续大量投入氮素对增加土壤碳氮存储意义甚微，而且容易因施氮过量而引发一系列生态环境问题。因而该

区实现碳氮平衡的思路主要应是保持稳定的碳氮关系,一方面宜将坡度较大或耕作条件较差的旱地变为林草地或园地,实现较好的碳氮比例关系;另一方面,应减少农地化学氮肥的投入,宜考虑配施缓控释肥,减少氮素损失,稳定土壤氮素水平,增加有机肥、农家肥的施用,逐步改善土壤理化性质,进而提高土壤固碳能力,实现土壤碳氮耦合平衡,促进土壤生态系统良性循环。

### 3 结 论

川中紫色丘陵区表层土壤有机碳、全氮含量30年来明显上升,土壤碳氮存储量大幅提升,并引起碳氮比大幅提升,但其碳氮相关系数有所下降,需要调控并稳定碳氮关系。SOC、TN时空演变格局由受结构性因素和随机性因素共同影响变为更倾向于受随机性因素影响。时空变化方面,大部分区域SOC、TN含量呈增加趋势,西北低山区、东南深丘区及东北浅丘区增幅明显。成土母质对SOC、TN时空变异无显著影响而土壤类型、土地利用方式、植被盖度、地形因子有极显著影响。30年来影响该区土壤碳氮时空演变格局的主控因素由土壤类型和土地利用方式共同主导变为主要受土地利用方式影响,土壤类型的影响下降但仍不容忽视,植被盖度的作用上升而地形因子的作用下降。土地利用方式已成为影响川中紫色丘陵区土壤碳、氮时空演变的主要驱动因素。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Wei R, Han Q T, Bo T, et al. China's crop productivity and soil carbon storage as influenced by multifactor global change. *Global Change Biology*, 2012, 18: 2945—2957
- [ 2 ] 潘晓健, 刘平丽, 李露, 等. 氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面 $N_2O$ 时空分布的影响. *土壤学报*, 2015, 52 (2): 364—371
- Pan X J, Liu P L, Li L, et al. Spatial and temporal distributions of soil profile  $N_2O$  as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (2): 364—371
- [ 3 ] Huang B, Sun W X, Zhao M S, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices. *Geoderma*, 2007, 139 (3/4): 336—345
- [ 4 ] Chaopricha N T, Marín-Spiotta E. Soil burial contributes to deep soil organic carbon storage. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 69: 251—264
- [ 5 ] Rasmussen C, Tom M S, Southard R J. Mineral assemblage and aggregates control carbon dynamics in a California conifer forest. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69 (6): 1711—1721
- [ 6 ] Zhang H L, Lal R, Zhao X, et al. Chapter one—opportunities and challenges of soil carbon sequestration by conservation agriculture in China. *Advances in Agronomy*, 2014, 124: 1—36
- [ 7 ] Tshering D, Inakwu OAO, Damien J F, et al. Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and land cover types in montane ecosystems, Eastern Himalayas. *Forest Ecology and Management*, 2014, 318: 91—102
- [ 8 ] Prietzel J, Christophel D. Organic carbon stocks in forest soils of the German Alps. *Geoderma*, 2014, 221/222: 28—39
- [ 9 ] Gelaw A M, Singh B R, Lal R. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 188: 256—263
- [ 10 ] 赵叶婷, 齐雁冰, 常庆瑞, 等. 渭河平原县域农田土壤有机质时空变化特征. *土壤学报*, 2013, 50 (5): 1049—1054
- Zhao Y T, Qi Y B, Chang Q R, et al. Spatio-temporal variation of soil organic carbon in farmland at a county scale in Weihe Plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 1049—1054
- [ 11 ] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素. *环境科学*, 2015, 36 (2): 652—660
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil nitrogen and related affecting factors at a county scale in hilly area of mid-Sichuan Basin (In Chinese). *Environmental Science*, 2015, 36 (2): 652—660
- [ 12 ] Zu B X, Jiang G Z, Gang L, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1989—2007
- [ 13 ] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素. *中国生态农业学报*, 2015, 23 (1): 34—42
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil organic carbon and related controlling factors in Renshou County, Sichuan Province (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-*

- Agriculture, 2015, 23 (1): 34—42
- [14] Li Q Q, Yue T X, Wang C Q, et al. Spatially distributed modeling of soil organic matter across China: An application of artificial neural network approach. *Catena*, 2013, 104: 210—218
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 108—109
- Lu R K. Analytical method for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 108—109
- [16] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布. *农业工程学报*, 2012, 26 (5): 188—194
- Zhang S M, Wang Z M, Zhang B, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2012, 26 (5): 188—194
- [17] Sumfleth K, Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators*, 2008, 8 (5): 485—501
- [18] 李启权, 王昌全, 张文江, 等. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测. *应用生态学报*, 2013, 24 (2): 459—466
- Li Q Q, Wang C Q, Zhang W J, et al. Prediction of soil nutrients spatial distribution based on neural network model combined with geostatistics (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (2): 459—466
- [19] Deng Q, Cheng X L, Yang Y H, et al. Carbon-nitrogen interactions during afforestation in central China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 69: 119—122
- [20] Ameloot N, Sleutel S, Das K C, et al. Biochar amendment to soils with contrasting organic matter level: Effects on N mineralization and biological soil properties. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 7: 135—144
- [21] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2015, 26 (1): 177—185
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil C/N ratio and its influence factors at a county scale in hilly area of Mid-Sichuan Basin, Southwest China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (1): 177—185
- [22] 张勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究. *环境科学*, 2008, 29 (8): 2314—2319
- Zhang Y, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Estimates and affecting factors of soil organic carbon storages in Yunnan-Guizhou-Guangxi region of China (In Chinese). *Environmental Science*, 2008, 29 (8): 2314—2319
- [23] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素. *生态学报*, 2013, 33 (16): 5058—5066
- Zhao M S, Zhang G L, Li D C, et al. Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (16): 5058—5066
- [24] 赵小敏, 邵华, 石庆华, 等. 近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 723—730
- Zhao X M, Shao H, Shi Q H, et al. Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 723—730
- [25] 李启权, 张新, 高雪松, 等. 川中丘陵县域土地利用程度与效益耦合协调格局分析. *农业现代化研究*, 2014, 35 (1): 97—102
- Li Q Q, Zhang X, Gao X S, et al. Spatial pattern of coupling and coordinating degree between land use and its efficiency at county scale in hilly region of Mid-Sichuan Basin (In Chinese). *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35 (1): 97—102
- [26] 孔涛, 张德胜, 寇涌苹, 等. 浑河上游典型植被河岸带土壤有机碳、全氮和全磷分布特征. *土壤*, 2014, 46 (5): 793—798
- Kong T, Zhang D S, Kou Y P, et al. Soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus distribution of typical vegetation riparian zones in upper reaches of Hun River (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (5): 793—798
- [27] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐黄淮泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析. *土壤学报*, 2013, 50 (1): 1—10
- Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai Alluvial Plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (1): 1—10
- [28] 李启权, 王昌全, 岳天祥, 等. 基于定性和定量辅助变量的土壤有机质空间分布预测—以四川三台县为例. *地理科学进展*, 2014, 33 (2): 259—269
- Li Q Q, Wang C Q, Yue T X, et al. Prediction of distribution of soil organic matter based on qualitative and quantitative auxiliary variables: A case study in Santai County in Sichuan Province (In Chinese). *Progress in Geography*, 2014, 33 (2): 259—269
- [29] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳

- 潜力分析. 土壤学报, 2006, 43 (1): 46—52
- Li Z P, Wu D F. Organic C content at steady state and potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (1): 46—52
- [30] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近30年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化. 土壤 (待刊)
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Changes of C, N and P ecological stoichiometry on different land use types in hilly area of Mid-Sichuan Basin, Southwest China in last 30 years (In Chinese). *Soils* (In press), [http://soils.issas.ac.cn/tr/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=2&file\\_no=20150724000002&journal\\_id=tr](http://soils.issas.ac.cn/tr/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=2&file_no=20150724000002&journal_id=tr)
- [31] 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研究. 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 (In Chinese). *Environmental Science*, 2011, 32 (5): 1407—1414

## Spatio-temporal Variations of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen and Driving Factors in Purple Soil Hilly Area of Mid-Sichuan Basin in the Past 30 Years

LUO Youlin<sup>1, 2</sup> LI Qiquan<sup>1, 2†</sup> WANG Changquan<sup>1</sup> FU Yuejun<sup>1</sup> XIN Zhiyuan<sup>1</sup> LI Bin<sup>1</sup> YUAN Dagang<sup>1</sup>

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

(2 Institute of Resources and Geography Information Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract** Soil organic carbon (SOC) and soil nitrogen (TN) are two important elements essential for vegetation growth, and meanwhile the major contributors of greenhouse gases, affecting the entire eco-environmental system. Accurate knowledge of how SOC and TN varies spatially and temporally and their driving factors at a regional scale is of some great significance to extrapolation of balanced fertilization based on soil C and N regulation as well as protection of the ecological environment. Therefore, based on the data gathered during the 2nd National Soil Survey in 1981 and the measured data of 555 soil samples (0~20cm) collected in 2012, exploration was done of characteristics of the temporal and spatial evolution of organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) and its driving factors in the Purple Soil Hilly area of Mid-Sichuan Basin over the past 30 years. With the aid of GS+7.0 and ArcGIS9.3, spatial structure and spatial distribution of the two nutrient elements was analyzed. By means of classic statistics analysis, variance analysis (ANOVA) and regression analysis, comparison was performed of soil parent material, soil type, land use type, topography and vegetation in impact on spatial-temporal evolution of SOC and TN under different. The classical statistical analysis indicates that the mean content of SOC in the topsoil layer was 6.41g kg<sup>-1</sup> in 1981 and 13.46 g kg<sup>-1</sup> in 2012, with coefficient of variation being 72.59% and 48.87%, respectively, and the mean content of TN was 0.88 g kg<sup>-1</sup> in 1981 and 1.12 g kg<sup>-1</sup> in 2012, with coefficients of variation being 40.04% and 38.75%, respectively. Apparently, the mean content of SOC increased by 109.98% and the mean content of TN by 27.27%, while their coefficients of variation showed a decreasing trend. The spatial structure analysis reveals that over the past 30 years, SOC and TN was affected jointly by structural and random factors, but tended to be more affected by random factors. The ArcGIS9.3 interpolation shows that SOC and TN contents increased in most parts of the study area, especially in areas of low mountains and deep hills. The ANOVA demonstrates that parent material did not have much impact on SOC and TN contents ( $p > 0.05$ ); While soil type, topography, vegetation cover and land use did ( $p < 0.001$ ). The regression analysis indicates that land use type was becoming the dominant factor affecting spatio-temporal variation of SOC and TN, which implies that human

cultivation is increasingly important in the spatial variation of both SOC and TN; while soil type was decreasing in its role but still cannot be overlooked as suggested in the structural analysis conducted here. The impact of topography was declining, while that of vegetation cover was rising over the past 30 years. The content of SOC and TN and the soil C/N was increasing, while the correlation coefficient of SOC and TN was decreasing slightly.

**Key words** Soil organic carbon; Total nitrogen; Spatiotemporal variations; Driving factors; Purple Soil Hilly area of Mid-Sichuan Basin

(责任编辑：檀满枝)