

## 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<sup>①</sup>

罗由林<sup>1</sup>, 李启权<sup>1,2\*</sup>, 王昌全<sup>1</sup>, 辛志远<sup>1</sup>, 王永豪<sup>1</sup>, 宋安军<sup>1</sup>, 万傲然<sup>1</sup>, 唐科<sup>3</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; 3 重庆大学法学院, 重庆 400044)

**摘要:** 基于 1981 年第二次土壤普查数据和 2012 年实地采样数据, 分析了紫色丘陵区 1981—2012 年不同土地利用方式下表层土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征变化。结果表明: 研究区近 30 年来土壤碳、氮含量增幅分别为 109.98%、27.27%, 磷含量基本稳定。1981 年土壤 C:N:P 比为 7.28:1:1, 2012 年 C:N:P 比为 16.41:1.37:1。各土地利用方式土壤碳、氮含量均有不同程度提升, 尤以林草地、园地提升最为明显; 水田、旱地、园地土壤磷含量基本稳定而林草地下降明显; 土壤 C/N、C/P、N/P 均有提升。30 年来表层土壤碳储量明显增加, 氮储量基本稳定而磷储量有所下降。

**关键词:** 土地利用方式; 碳; 氮; 磷; 生态化学计量特征

**中图分类号:** S152.4; S153.6

生态化学计量学是一门研究生态系统能量平衡和多重化学元素(主要是 C、N、P)平衡等对生态交互作用的科学<sup>[1-2]</sup>。作为一种新兴生态学研究领域, 已成为生态学与生物化学、土壤化学研究领域的新方向, 为研究土壤-植物相互作用与 C、N、P 循环提供了新思路<sup>[3-5]</sup>, 在种群动态、养分循环、限制性元素判断、养分利用效率乃至全球 C、N、P 生物地球化学循环等领域得到广泛应用<sup>[6-8]</sup>, 并取得许多研究成果<sup>[9-11]</sup>。其中, C 与 N、P 等养分元素的循环过程具有相互耦合关系, 强烈的影响着生态系统的 C、N 循环过程<sup>[12]</sup>, 成为全球变化的研究热点之一。土壤作为陆地生态系统最大的有机碳库, 是植物、微生物生态系统 C、N、P 等元素的重要来源<sup>[10]</sup>。土壤系统中的食物链正日益被当作养分循环的重要调节者, 土壤 C、N、P 作为重要营养元素和生态环境因子, 其含量变化会影响土壤中微生物数量、有机物分解速率及养分的长期积累<sup>[13-14]</sup>。因而研究土壤 C、N、P 的生态化学计量在养分平衡管理及 C、N 循环变化等方面具有重大意义。

土地利用变化和土地管理实践措施都会改变生物地球化学和生态系统 C、N、P 生态化学计量特征<sup>[15-16]</sup>。一方面, 不同土地利用方式下进入土壤的

肥料和植物残体在数量和性质上均有差异<sup>[17-19]</sup>; 另一方面, 耕作方式等农业管理措施差异, 会通过影响土壤养分的矿化、运输、吸收利用等差异进而影响土壤 C、N、P 等养分循环<sup>[20-23]</sup>。随着气候变化和生态环境的恶化<sup>[24-25]</sup>, 农业生产理念已发生重大改变, 由高投入高产出的思想逐渐转变为更加重视农业生产与生态环境的协调, 实现经济效益、社会效益与环境效益的统一<sup>[26-27]</sup>。这对农业施肥管理和土地利用方式优化提出了更高的要求。因而研究不同土地利用方式对土壤 C、N、P 含量及其对生态系统的长期影响对现代农业生产和生态环境保护具有迫切而重要的现实意义。

近几十年来, 中国土地利用变化剧烈, 生态环境状况面临严峻形势, 政府对土地利用结构和方式的进行了不断调整, 如在长江中上游的退耕还林工程、京津生态防护林建设、西部大开发等策略, 这些势必会对土壤 C、N、P 及生态系统造成影响<sup>[28-30]</sup>。四川盆地属于西部大开发地区, 也是中国南方典型的紫色盆地, 盆地丘陵区人口密度大, 土地垦殖率高, 是重要的农耕区和长江水土流失重点防治区。该区已有研究多集中于土壤养分空间变异特征方面<sup>[31-32]</sup>, 且多涉及为小流域或小尺度地区<sup>[33-34]</sup>, 有关其土壤 C、N、

基金项目: 国家自然科学基金项目(4120124)和四川省科技支撑计划项目(四川省-中科院合作项目 2012JZ0003)资助。

\* 通讯作者(liqq@reis.ac.cn)

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

P 长期变化及其生态化学计量特征的资料缺乏；而研究其土壤 C、N、P 及其生态化学计量特征变化趋势对该区土壤 C、N、P 调控及生态效应改善皆有重要指导作用。本研究选取川中丘陵第一大县仁寿县为案例区，通过整合该区 1981 年的 214 个第二次土壤普查数据并结合 2012 年实地采集的 555 个土样数据比较分析近 30 年来该区不同土地利用方式下土壤 C、N、P 变化及其生态化学计量特征，以期为紫色丘陵区养分动态平衡管理与生态环境的协调统一提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地丘陵区(29°37'~30°20'N，

103°54'~104°29'E)，面积 2 606 km<sup>2</sup>，其中农业用地约占 82%，人口 162 万，人口密度约为 600 人/km<sup>2</sup>，辖 22 个镇、38 个乡，为川中丘陵区第一大县和第一人口大县。地貌以丘陵为主，海拔位于 345~972 m 之间，含部分低山区域(图 1)。县域处于亚热带湿润性季风气候区，四季分明，雨热同期，年均气温 17.4℃，年均降雨 1 009.4 mm，年均日照时数 1 196.6 h，无霜期 312 天。土壤母质除有少量第四系老冲洪积物外，主要为侏罗系、白垩系和三叠系出露的紫色岩层；主要发育土壤类型为紫色土、水稻土、黄壤。土地利用方式包括耕地、园地、林草地等，土地利用程度较高。20 世纪 80 年代全区森林覆盖率约为 4.70%，到 21 世纪初恢复达到 19.96%，是长江上游人口最为密集的典型农业区和水土流失重点防治区。

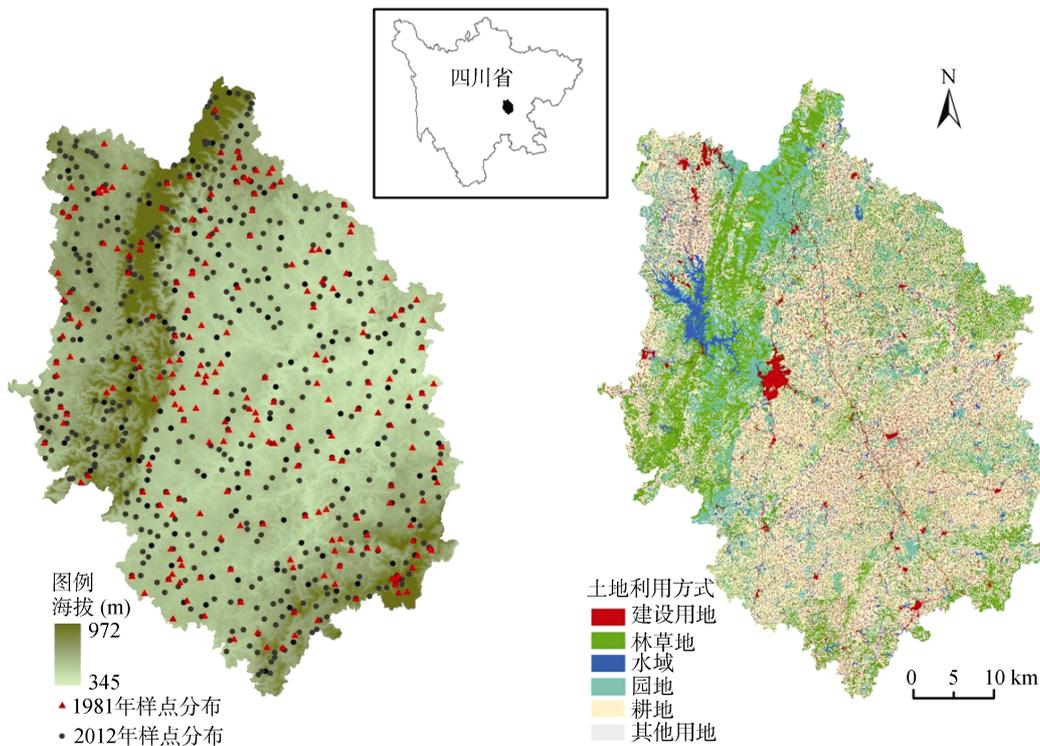


图 1 研究区位置、采样点分布图及土地利用现状

Fig. 1 Basic geographic information of study area, spatial distribution of soil sampling sites, and map of land use types

### 1.2 数据来源

研究区 1981 年土壤数据来自于第二次全国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《仁寿土壤》、《四川土壤》、《区域土壤地理》等资料中，每一个剖面都较详细地记录了该土壤剖面的采样地点、成土母质、土壤类型、地形特征、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>[35]</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 个具有相对准确位置信息的典型剖面(图 1)。

### 1.3 样品采集

2012 年数据在根据研究区的实际情况并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,在全县共计采集表层(0~20 cm)土壤样点 558 个(图 1)。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。采样的同时记录每个采样点的地理坐标、海拔、成土母质、土地利用方式、土壤类型、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,研磨过 100 目筛待测。

#### 1.4 实验方法

土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾外源加热法测定,总磷(TP)含量采用钼锑抗比色法测定<sup>[36]</sup>;总氮(TN)含量采用 Foss Kjeltac8400 全自动凯氏定氮仪进行测定。

#### 1.5 数据处理

利用均值  $\pm 3$  倍标准差的方法剔除了 2012 年的 3 个异常样点数据,用 1981 年的 214 个样点数据和 2012 年剩余的 555 个样点数据进行分析。文中图表制作在 Excel 2010 实现,基本统计特征、方差分析等均在 SPSS 20 完成。

#### 1.6 土壤碳氮磷储量计算方法

本文土壤 C、N、P 储量估算方法如下:

$$S=C \times \rho \times D \times 10^{-1} \times A$$

式中: $S$  为土壤有机碳(全氮、全磷)储量(单位:t/hm<sup>2</sup>); $C$  为有机碳(全氮、全磷)含量(单位:g/kg); $\rho$  为土壤容重(单位:g/cm<sup>3</sup>); $D$  为土层厚度(单位:cm); $A$  为面积(单位:km<sup>2</sup>)。

## 2 结果与分析

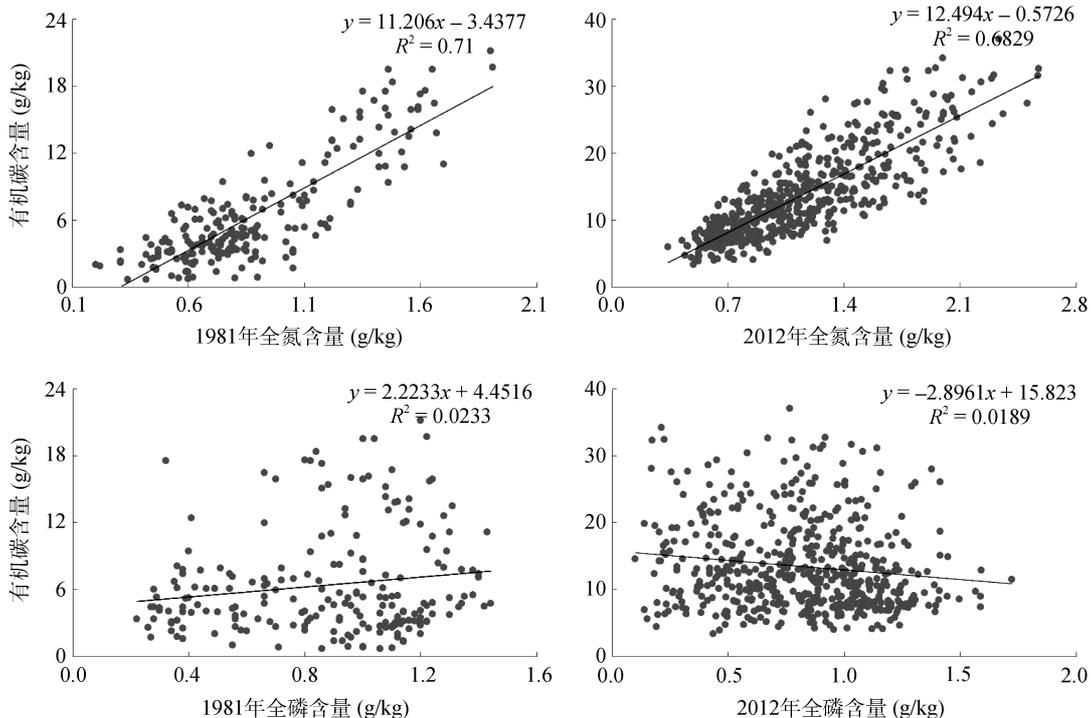
### 2.1 土壤碳氮磷含量及其相关关系

统计结果显示(表 1),30 年来该区 C 含量(即有机碳)由 6.41 g/kg 上升到 13.46 g/kg,增幅 109.98%;N 含量(即全氮)由 0.88 g/kg 上升到 1.12 g/kg,增幅 27.27%;P 含量(即全磷)在 1981 年为 0.89 g/kg,到 2012 年为 0.82 g/kg,基本稳定。C、N、P 含量的不同变化特征,引起 C:N:P 三者间比例关系发生较大变化,1981 年 C:N:P 比约为 7.28:1:1,2012 年 C:N:P 比为 16.41:1.37:1。其中土壤 C/N 由 6.85 上升到 11.93,增幅 75.96%;相关系数由 0.71 降至 0.68。N/P 由 1.15 升到 1.69,增幅 46.96%。N/P 由 8.25 上升到 21.67,增幅 162.67%。全区土壤 C/N、C/P、N/P 之间的比例关系均有提升,而相关系数均有不同程度的下降(图 2)。

表 1 不同时期土壤 C、N、P 含量及比值

Table 1 Descriptive statistics of contents and ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorous contents in different years

年份	C(g/kg)	N(g/kg)	P(g/kg)	C/N	N/P	C/P
1981 年	6.41 $\pm$ 0.32	0.88 $\pm$ 0.02	0.88 $\pm$ 0.02	6.85 $\pm$ 0.20	1.15 $\pm$ 0.04	8.25 $\pm$ 0.46
2012 年	13.46 $\pm$ 0.28	1.12 $\pm$ 0.02	0.82 $\pm$ 0.01	11.93 $\pm$ 0.13	1.69 $\pm$ 0.05	21.67 $\pm$ 0.91



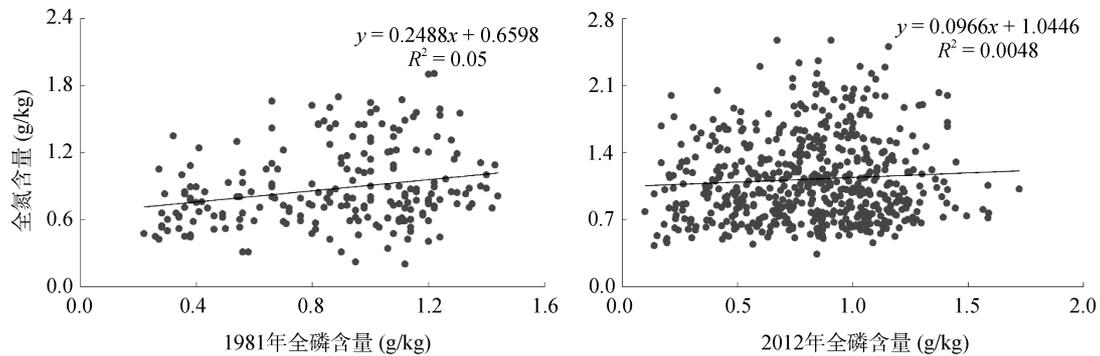


图 2 1981 年和 2012 年研究区土壤 C、N、P 相关关系  
Fig. 2 Correlations of soil carbon, nitrogen and phosphorus in 1981 and 2012

### 2.2 不同土地利用方式土壤碳氮磷含量变化

不同土地利用方式下的土壤 C、N、P 呈现出不同的变化特征(表 2)。1981 年各土地利用方式间 C 含量差异明显,表现为水田>林草地>园地、旱地;2012 年表现为水田、林草地>园地>旱地;30 年来,各土地利用方式土壤 C 含量均大幅增加,水田与林草地之间 C 含量已无明显差异,园地与旱地之间 C 含量已有显著差异。N 含量也有显著变化,1981 年 N 含量为水田>林草地、旱地、园地;2012 年表现为水田>林草地>园地>旱地,30 年来林草地、园地 N 含量明

显变化,与 C 呈现出类似的变化趋势。P 含量变化与 C、N 含量变化不同,1981 年仅园地与林草地之间 P 含量存在显著差异。2012 年 P 含量为:园地、旱地>水田>林草地。2 个时期 P 含量均以园地最高,林草地最低,30 年来旱地、园地、水田 P 含量基本稳定,林草地显著下降。

总体来看,30 年来不同土地利用方式 C 含量均有显著增加;水田、园地、林草地 N 含量显著增加而旱地增长不明显;P 含量在林草地明显下降,在水田、园地、旱地均无显著变化。

表 2 不同土地利用方式土壤 C、N、P 含量统计特征  
Table 2 Descriptive statistics of soil carbon, nitrogen and phosphorous contents under different land use types

指标	年份	水田	旱地	园地	林草地
		(n <sub>1981</sub> =80; n <sub>2012</sub> =203)	(n <sub>1981</sub> =105; n <sub>2012</sub> =154)	(n <sub>1981</sub> =24; n <sub>2012</sub> =60)	(n <sub>1981</sub> =15; n <sub>2012</sub> =138)
C(g/kg)	1981	10.45 ± 0.56 Aa	3.69 ± 0.17 Ac	3.83 ± 0.46 Ac	6.26 ± 0.71 Ab
	2012	17.10 ± 0.38 Ba	7.74 ± 0.16 Bc	10.38 ± 0.41 Bb	15.84 ± 0.64 Ba
N(g/kg)	1981	1.15 ± 0.04 Aa	0.70 ± 0.02 Ab	0.77 ± 0.06 Ab	0.74 ± 0.05 Ab
	2012	1.40 ± 0.03 Ba	0.79 ± 0.02 Ad	0.96 ± 0.04 Bc	1.15 ± 0.04 Bb
P(g/kg)	1981	0.88 ± 0.04 Aab	0.88 ± 0.03 Aab	1.00 ± 0.06 Aa	0.78 ± 0.10 Ab
	2012	0.79 ± 0.02 Ab	0.92 ± 0.02 Aa	0.98 ± 0.04 Aa	0.66 ± 0.02 Bc

注:表中不同大写字母表示某一指标在不同时期的同一土地利用方式下差异显著(P<0.05),不同小写字母表示同一时期某一指标在不同土地利用方式之间差异显著(P<0.05);n 代表样本数量。

### 2.3 土壤碳氮磷化学计量学特征

土壤 C、N、P 生态化学计量学能揭示生态系统中各组分养分比例调控机制,认识养分比例在生态系统过程和功能中的作用,利于揭示元素间相互作用与制约规律。近 30 年来,不同土地利用方式 C、N、P 含量的变化显著影响着土壤 C:N:P 比值关系(表 3)。1981 年各土地利用方式下土壤 C/N 表现为:水田、林草地>旱地、园地;水田与林草地、旱地与园地 C/N 接近,但水田、林草地土壤 C/N 显著高于旱地、园地。C/P 表现为水田>林草地、旱地、园地,N/P 表现为水田>林草地、旱地、园地;水田 C/N、C/P 均显著高于林草地、旱地、园地,而旱地、园地、

林草地 C/P 之间无显著差异。2012 年不同土地利用方式 C/N、C/P、N/P 发生变化。其中 C/N 为:林草地>水田>园地、旱地。C/P 为:林草地、水田>园地、旱地。N/P 为林草地、水田>园地、旱地。土壤 C/N、C/P、N/P 在 1981 年均以水田最高,园地最低,在 2012 年以林草地最高而旱地最低。

不同土地利用方式土壤 C/N、C/P、N/P 变化幅度呈现不同变化特征。30 年来水田和林草地 C/N、C/P、N/P 均大幅提升。旱地 C/N、C/P 大幅提升,N/P 基本保持稳定。园地 C:N:P 比值均有提升。各种土地利用方式下 C/P 均大幅增长,其中林草地、园地增长约 2 倍,水田、旱地增长约 1 倍。水田 C/N、

表 3 不同土地利用方式下土壤 C、N、P 关系  
Table 3 Correlations of soil carbon, nitrogen and phosphorous contents under different land use types

地类	指标	年份	均值	拟合方程	相关系数
水田	C/N	1981	8.77	$Y=11.601 0x-2.926 8$	0.737 0
		2012	12.35	$Y=10.208 0x+2.784 3$	0.485 5
	C/P	1981	13.16	$Y=5.169 2x+5.902 5$	0.110 2
		2012	26.87	$Y=-0.250 6x+17.295$	0.000 2
	N/P	1981	1.47	$Y=0.478 0x+0.732 6$	0.172 0
		2012	2.11	$Y=0.309 1x+1.157 3$	0.066 0
旱地	C/N	1981	5.39	$Y=3.829 3x+0.999 6$	0.197 3
		2012	10.02	$Y=5.119 7x+3.679$	0.261 7
	C/P	1981	5.06	$Y=0.453 2x+3.292 9$	0.006 7
		2012	9.65	$Y=0.837 1x+6.968 8$	0.015 8
	N/P	1981	0.96	$Y=0.080 0x+0.632 4$	0.015 5
		2012	0.97	$Y=0.157 1x+0.648 5$	0.055 7
园地	C/N	1981	5.30	$Y=2.762 9x+1.699 1$	0.125 3
		2012	11.15	$Y=7.574 9x+3.077 9$	0.564 3
	C/P	1981	4.15	$Y=-0.033 8x+3.866 3$	0.000 5
		2012	11.91	$Y=1.858 3x+8.565 1$	0.027 5
	N/P	1981	0.83	$Y=-0.143 4x+0.916 0$	0.024 8
		2012	1.10	$Y=0.264 9x+0.705 3$	0.056 9
林草地	C/N	1981	8.28	$Y=8.996 4x-0.442 6$	0.475 6
		2012	13.80	$Y=13.45 4x+0.359 1$	0.723 2
	C/P	1981	9.73	$Y=2.326 6x+4.432 7$	0.106 0
		2012	31.70	$Y=1.97 8x+14.538$	0.004 8
	N/P	1981	1.17	$Y=0.349 0x+0.471 1$	0.405 7
		2012	2.15	$Y=0.498 2x+0.822 2$	0.076 0

N/P 增幅均较小;旱地 C/N 增幅均较大而 N/P 基本保持稳定。这与不同土地利用方式土壤 C、N、P 含量变化幅度的差异息息相关。

#### 2.4 土壤碳氮磷储量的变化

据《仁寿土壤》记载,1981 年该区土壤容重平均值为  $1.44 \text{ g/m}^3$ , 根据该区土壤有机质含量与土壤容重间的对应关系,2012 年土壤容重平均值为  $1.13 \text{ g/m}^3$ 。全区农业用地面积约  $2 135 \text{ km}^2$ ;估算得到其土壤 C、N、P 储量信息(表 4):1981 年该区农业土壤 C 储量约  $3.94 \times 10^6 \text{ t}$ ,2012 年约  $6.96 \times 10^6 \text{ t}$ ,30 年间储量增幅 64.74%。N 储量在 1981 年约  $5.41 \times 10^5 \text{ t}$ ,2012 年约为  $5.40 \times 10^5 \text{ t}$ ,储量相对稳定。P 储量在 1981 年约为  $5.41 \times 10^5 \text{ t}$ ,2012 年约为  $3.96 \times 10^5 \text{ t}$ ,降幅 26.80%。

表 4 不同时期土壤 C、N、P 储量  
Table 4 Carbon, nitrogen and phosphorous storages in different years

年份	C 储量( $\times 10^5 \text{ t}$ )	N 储量( $\times 10^5 \text{ t}$ )	P 储量( $\times 10^5 \text{ t}$ )
1981	39.41	5.41	5.41
2012	64.95	5.40	3.96
变幅	64.74%	-0.18%	-26.80%

30 年来,表层土壤 C 储量上升,N 储量相对稳定,P 储量下降,表层土壤 C、N、P 含量呈现出失衡变化;C、N、P 储量变化幅度明显低于 C、N、P 含量变化幅度。

### 3 讨论

#### 3.1 对土壤碳氮磷含量的影响

近 30 年来,不同土地利用方式下的土壤 C、N、P 呈现出不同的变化特征。各土地利用方式土壤 C 含量均大幅增加,并引起不同土地利用方式之间 C 含量差异改变;其中林草地与水田之间 C 含量已无显著差异,园地 C 含量显著高于旱地,反映出林草地与园地土壤 C 含量明显上升,C 储能力显著。这主要是自然土壤受人为翻耕影响小,C 汇作用较为明显<sup>[37]</sup>。林草地、园地 N 含量明显变化,与 C 呈现出类似的变化趋势,显示出园地、林草地 C、N 之间有着较好相关性。这主要是随着时间推移,植被生产力的恢复和提升,大量地上凋落物归还土壤,有机碳易于累积增长,而土壤中 N 素多以有机氮的形态存在于有机质中,林草地 C、N 之间又具有良好的相关性,进而

N 含量也会随 C 含量增加而增加<sup>[38]</sup>。

P 含量变化与 C、N 含量变化不同,表现为旱地、园地、水田 P 含量基本稳定,主要是旱地、园地、水田土壤有一定 P 肥补充且 P 作为沉积性矿物,较为稳定;林草地显著下降。这主要与该区林草地多源于退耕还林有关和植物生长年限有关,有研究显示随着植被生长年限的增加表层土壤 P 含量会呈现出现上升后下降的趋势<sup>[34,39]</sup>。总体来看,30 年来不同土地利用方式土壤 C 含量均有显著增加;水田、园地、林草地 N 含量显著增加而旱地增长不明显;P 含量在水田、园地、旱地均无显著变化,林草地 P 含量明显下降。

### 3.2 对土壤碳氮磷化学计量的影响

土壤 C、N、P 三者之间存在着相互平衡与制约的关系,土壤 C:N:P 化学计量比值差异能反映并影响这种关系;土壤 C/N 主要通过影响微生物活性来影响有机质分解速率,进而影响土壤 C、N 循环;N/P 可作为 N 饱和的诊断指标,并被用于确定养分的阈值。在这项研究中,研究区近 30 年来,不同土地利用方式土壤 C:N:P 比值呈现出不同变化特征(表 3)。其中,水田 C/P、N/P 增加,水田 C/N、C/P、N/P 相关系数( $R^2$ )均明显下降,表明水田在 30 年来 N 素施用量明显增加,而有机碳增长速度相对减缓,继续增施 N 肥对提升 C 储量意义甚微,其土壤 N 素持有水平基本已经饱和,并可能存在施 N 过量的现象<sup>[40]</sup>;同时长期以来虽存在着偏施 N 肥而相对忽视 P 肥投入的现象,但 P 素仍旧保持稳定水平,这主要与西部紫色丘陵区土壤 P 背景值较高有关。旱地 C/N、C/P 增加,N/P 基本保持稳定。旱地有机碳提升明显,全 N、全 P 含量基本处于稳定状态,30 年来旱地土壤肥力状况有所改善。

园地 C/N、C/P、N/P 均有不同程度的增加,C:N:P 比例关系明显改善。这与园地 C、N 含量明显增加而 P 含量基本稳定有关。园地土壤 C:N 相关系数有较大提升,反映出园地土壤 C、N 关系呈良性发展态势。林草地 C/N、C/P、N/P 均有大幅提升,其中 C/P 增长高达 2 倍,这主要与林草地 C、N 含量大幅提升而 P 含量明显下降和植被凋落物 N/P 变化有关;已有长期观测研究显示,随着植物生长,新鲜凋落物和腐殖质的 N/P 将增加<sup>[34]</sup>,凋落物进入土壤引起林草地土壤 N/P 相应上升。这反映出林草地近 30 年来固 C 能力稳步提升,植被对土壤 P 的消耗量高于其生产补给量,土壤 P 含量制约着整个林草地 C:N:P 关系。各种土地利用方式下 C/P 值均大幅增长,其中林草地、园地增幅约 2 倍,水田、旱地增幅约 1

倍。园地 C/N 增幅最大,林草地 N/P 增幅最高,水田 C/N、N/P 增幅均较小;旱地 C/N 增幅均较大而 N/P 基本保持稳定。这与各土地利用方式土壤 C、N、P 含量变化幅度密切相关,其 C、N、P 含量变化影响着 C:N:P 三者之间的比值关系,同时 C:N:P 三者之间的比值关系通过影响其养分有效性进而作用于土壤 C、N、P 含量变化。

## 4 结论

研究区近 30 年来 C、N 含量均有不同程度增长,P 含量相对稳定。C/N、C/P、N/P 也表现出不同程度的上升,尤以 N/P 增至 1981 年的 3 倍,但其相关系数总体均呈现出下降趋势。不同土地利用方式下土壤 C、N、P 含量及 C:N:P 比值关系呈现出不同的变化特征。C、N 含量均以林草地、园地增幅最为明显,P 含量除林草地明显下降外,水田、旱地、园地均基本稳定。各土地利用方式土壤 C/N、C/P、N/P 均有不同程度上升,旱地土壤 C、N、P 关系变化相对稳定而园地 C、N、P 之间的关系显著改善;林草地土壤 C、N 储量明显提升。近 30 年来该区表层土壤 C 储量明显增加,N 储量基本稳定,P 储量有所下降。

### 参考文献:

- [1] Stemer R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton: Princeton University Press, 2002
- [2] 王绍强,余贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3 937-3 947
- [3] Michaels A F. The ratios of life[J]. Science, 2003, 300: 906-907
- [4] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101 (30): 11 001-11 006
- [5] Elser J J, Bracken M E, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2007, 10: 1 135-1 142
- [6] Hobbie S E, Nadelhoffer K, Hgbery P. A synthesis: The role of nutrients as constraints on carbon balance in boreal and arctic regions[J]. Plant and Soil, 2002, 242: 163-170
- [7] 王加恩,郑洁,康占军,等. 浙北典型稻作区近 30 年表层土壤碳氮含量变化[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1 191-1 196
- [8] Yang Y H, Luo Y Q. Carbon: nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development[J]. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(2): 354-361

- [9] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870–879
- [10] Gao Y, He N P, Yu G R, et al. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: A case study in China[J]. Ecological Engineering, 2014, 67: 171–181
- [11] Deng Q, Cheng X L, Yang Y H, et al. Carbon-nitrogen interactions during afforestation in central China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 69: 119–122
- [12] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratios” for the microbial biomass?[J]. Biogeochemistry, 2007, 85: 235–252
- [13] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in Chin's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139–151
- [14] Kirkby C A, Kirkegaard J A, Richardson A E, et al. Stable soil organic matter: A comparison of C : N : P : S ratios in Australian and other world soils[J]. Geoderma, 2011, 163(3/4): 197–208
- [15] Power J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in Northeastern Costa Rica[J]. Ecosystems, 2004, 7(2): 134–146
- [16] Wei X R, Shao M G, Fu X L, et al. Distribution of soil organic C, N and P in the adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China[J]. Biogeochemistry, 2009, 96(1): 149–162
- [17] 侯晓静, 杨劲松, 赵曼, 等. 不同施肥措施对滨海盐渍土有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(5): 780–786
- [18] 杨文, 周脚根, 王美慧, 等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1 336–1 344
- [19] 青焯, 孙飞达, 李勇, 等. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 38–47
- [20] 李小刚, 马有华, 王强, 等. 县域耕地土壤养分的时空变化及区域施肥研究—以肥东县为例[J]. 土壤, 2014, 46(6): 976–983
- [21] 周睿, 潘贤章, 王昌坤, 等. 上海市城郊土壤有机质的时空变异特征及其影响因素[J]. 土壤, 2014, 46(3): 433–438
- [22] Alvarez C, Alvarez C R, Costantini A, et al. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina)[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 142: 25–31
- [23] 侯晓静, 杨劲松, 王相平, 等. 不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 818–827
- [24] Lutze J L, Gifford R M. Nitrogen accumulation and distribution in *Danthonia richardsonii* swards in response to CO<sub>2</sub> and nitrogen supply over four years of growth[J]. Global Change Biology, 2000, 6(1): 1–12
- [25] Wei R, Han Q T, Bo T, et al. China's crop productivity and soil carbon storage as influenced by multifactor global change[J]. Global Change Biology, 2012, 18: 2 945–2 957
- [26] 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
- [27] Bayer C, Gomes J, Zanatta J A, et al. Soil nitrous oxide emissions as affected by long-term tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 213–222
- [28] Zu B X, Jiang G Z, Gang L, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 1 989–2 007
- [29] Wang H J, Shi X Z, Yu D S, et al. Factors determining soil nutrient distribution in a small-scaled watershed in the purple soil region of Sichuan Province, China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 300–306
- [30] Zeng X H, Zhang W J, Cao J S, et al. Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the “Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control” program in China[J]. Catena, 2014, 118: 186–194
- [31] 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[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 652–660
- [32] 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[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 34–42
- [33] 李婷, 张世熔, 刘浔, 等. 沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 863–868
- [34] Wardle D A, Walker R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contracting long-term chronosequences[J]. Science, 2004, 305: 509–513
- [35] 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[J]. Catena, 2013, 104: 210–218
- [36] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [37] 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[J]. 土壤, 2014, 46(5): 793–798
- [38] 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[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 177–185
- [39] 李炜, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 9–16
- [40] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 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[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 582–593

## Last 30a Changes of C, N and P Ecological Stoichiometry of Different Land Use Types in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin, Southwest China

LUO Youlin<sup>1</sup>, LI Qiquan<sup>1,2\*</sup>, WANG Changquan<sup>1</sup>, XIN Zhiyuan<sup>1</sup>, WANG Yonghao<sup>1</sup>,  
SONG Anjun<sup>1</sup>, WAN Aoran<sup>1</sup>, TANG Ke<sup>3</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; 3 Law School, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Based on the 2<sup>nd</sup> National Soil Survey Data in 1980s and the measured data of 555 soil samples (0–20 cm) in 2012, the changes of C, N and P ecological stoichiometry of different land use types over 30 years were analyzed in this paper. The results showed that soil carbon and nitrogen increased by 109.98% and 27.27% respectively, while phosphorus content remained stable in the last 30 years. Soil C : N : P ratio of 1981 was 7.28 : 1 : 1 and was 16.41 : 1.37 : 1 in 2012. The contents of soil carbon and nitrogen all increased in each land use type, especially in forest and grassland and garden; the contents of soil phosphorus retained stable in paddy field, dry land and orchard while decreased significantly in forest and grassland. Soil C/N, C/P and N/P increased in each land use type. In the last 30 years, carbon storage of topsoil increased significantly, nitrogen storage remained stable and phosphorus storage declined.

**Key words:** Land use type; Carbon; Nitrogen; Phosphorous; Ecological stoichiometry