

苏同庆, 崔婷婷, 张建兵, 等. 土地利用方式对广西平果喀斯特土壤碳氮磷全量与易利用组分的影响[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 311-320.

DOI: 10.11932/karst20230205

土地利用方式对广西平果喀斯特土壤碳氮磷全量与易利用组分的影响

苏同庆¹, 崔婷婷¹, 张建兵¹, 罗为群^{2,3}, 胡宝清¹

(1. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西南宁 530001; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 3. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西平果 531400)

摘 要:以广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站及周边地块的三种土地利用方式(退耕林地、退耕草地、耕地(甘蔗地和玉米地))为研究对象,通过采集 0~15 cm 表层土壤,分析土壤的理化性质和土壤碳、氮、磷全量与易利用组分及其关系,以期能更加准确地理解和把握退耕还林还草、土地利用方式转变对喀斯特地区土壤碳、氮、磷全量及易利用组分的影响。结果表明:(1)与耕地相比,退耕后林地和草地土壤 pH 值显著升高,大团聚体、速效氮显著增加,微团聚体、速效磷显著减少。(2)退耕后林地和草地土壤有机碳较耕地显著增加,林地和草地分别是甘蔗地的 1.98 和 1.88 倍,分别是玉米地的 2.15 和 2.04 倍。林地和草地土壤微生物生物量碳、全氮、微生物生物量氮较耕地也明显提高。对于磷,草地全磷($1.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)最高,其次玉米地($0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),且甘蔗地和玉米地的可溶性磷均显著高于林地和草地。在土壤碳氮磷生态化学计量比方面,林地的 OC/TP、TN/TP 显著高于草地和耕地,而草地和耕地没有显著差异。(3)土壤容重、团聚体结构、pH、速效氮、速效磷都与土壤碳、氮、磷全量与易利用组分有着显著的相关关系。上述结果表明,退耕还林还草、土地利用方式转变显著提高了喀斯特土壤碳、氮水平,提升了土壤质量,退耕还林还草、转变土地利用方式是喀斯特地区石漠化治理、生态环境保护的重要、有效途径。

关键词:土地利用方式; 广西平果; 喀斯特; 碳; 氮; 磷

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)02-0311-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

土壤碳、氮、磷是土壤质量的重要因子,在提高土壤养分储量、改善土壤肥力、促进植物生长方面具有重要作用。土壤有机碳、全氮、全磷是不同形

态有机碳、氮、磷的总称,而不同形态有机碳、氮、磷对环境变化的敏感程度与响应程度不同^[1]。普遍认为,测定有机碳、氮、磷的活性组分是比测定全量更有效的监测土壤养分库对环境响应的方法^[2]。有机碳、氮、磷的活性组分在土壤中含量不高,却很容易

基金项目: 国家自然科学基金(31960238; 42071135); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD19245103; 桂科 AD19110142); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2019KY0421); 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室(南宁师范大学)和广西地表过程与智能模拟重点实验室(南宁师范大学)系统基金项目(GTEU-KLOP-X1813)

第一作者简介: 苏同庆(1982—), 助理研究员, 博士, 研究方向为土壤肥力、土壤生态。E-mail: tqsu2007@163.com。

通信作者: 张建兵(1984—), 研究员, 博士, 研究方向为土壤过程及其环境效应。E-mail: zjb1166@163.com。

收稿日期: 2022-05-18

受环境影响而发生变化,其易于被植物和微生物利用,直接参与土壤生物化学过程,在碳、氮、磷循环中起着重要作用^[3]。

喀斯特(岩溶)地貌在中国西南广泛分布,其岩溶发育强烈,基岩裸露,生态敏感度高,是具有特殊物质、能量、结构与功能的生态系统^[4]。广西是中国重要的岩溶区之一,岩溶面积占总面积的 42%^[5],不合理的开发利用和过度垦殖造成岩溶区水土严重流失,生态环境恶化^[6]。经过退耕还林还草工程和石漠化治理工程的实施,土地利用方式发生显著改变,生态环境得到明显改善。多位专家学者对退耕还林还草、土地利用方式改变引起的土壤养分状况及其生态化学计量比进行了研究^[7-9]。研究指出,贵州安顺高原峡谷不同土地利用和石漠化治理方式中,圆柏、圆柏女贞混交、撂荒草地的土壤有机碳、全氮含量均显著高于坡耕地,而火龙果、火龙果花椒混交、皇竹草则显著低于坡耕地^[10]。广西北部环江山区退耕还林还草、不同土地利用方式中,次生林、灌草的土壤有机碳、全氮、微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷均显著高于耕地,而全磷显著低于耕地^[11]。对于土壤碳、氮、磷全量与易利用组分的系统研究在广西中部右江河谷平果典型喀斯特地区鲜有报道。因此,本研究以广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站及其周边地块的三种土地利用方式样地(退耕林地、退耕草地,耕地(甘蔗地和玉米地))为对象,探讨土壤碳、氮、磷全量、易利用组分及其关系,以期能更加准确地理解和把握喀斯特地区退耕还林还草、土地利用方式转变对土壤碳、氮、磷的影响,为喀斯特地区退耕还林还草、石漠化治理提供理论依据与数据支撑。

1 研究区概况

广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站位于广西平果市果化镇(23°22'-23°23' N, 107°22'-107°23' E),总面积约为 2.71 km²。研究站地处亚热带季风气候区,年均温为 21 ℃,年均降水量为 1 322 mm。地貌属典型喀斯特峰丛洼地,海拔 176~535 m,岩性主要为纯灰岩和硅质灰岩,土壤以岩溶石灰土为主,主要为棕色石灰土和黄棕色石灰土,土壤厚度受地形因素影响较大,一般而言,洼地土层较厚,峰丛坡中、坡顶土壤较为浅薄,局部地段

基岩裸露于地表。植被类型主要为稀疏林地、灌丛和低矮灌草,耕地以种植玉米—黄豆的旱作坡耕地为主。

2 研究方法

2.1 样品采集

在研究区遵循典型性和代表性原则,选取三种土地利用方式样地(退耕林地(林地 F)、退耕草地(草地 G)、耕地(甘蔗地 S、玉米地 M))的土壤为研究对象,样地基本信息详见表 1。

土壤样品采集于 2021 年 3 月。样品采集时首先去除表面的枯枝落叶,每种类型地块均用土钻取 3 个 0~15 cm 表层土壤样品,每个样品均通过 S 形布点、在 5 个点取土混合而成,同时每种类型地块用环刀采集 3 个原状土样品,共计 12 个土壤样品和 12 个原状土样品。土壤样品带回实验室后,一部分鲜土过 2 mm 筛用于可溶性碳、氮、磷和微生物生物量碳、氮、磷的测定;一部分鲜土风干,用于测定土壤团聚体和 pH、有机碳、全氮、速效氮、全磷、速效磷;原状土样品用于测定土壤容重。

2.2 土壤样品测定

本研究主要测定土壤理化特征和土壤碳、氮、磷全量及其易利用组分特征。土壤理化特征中,容重采用环刀法测定,pH 采用玻璃电极法(土水比为 1:2.5)测定,速效氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定^[12]。土壤团聚体采用湿筛法测定^[13],分别得到>2 mm(大团聚体)、0.25~2 mm(小团聚体)、0.053~0.25 mm(微团聚体)、<0.053 mm(其他)粒径的团聚体。土壤碳、氮、磷全量及其易利用组分特征中,有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法测定,全氮采用 H₂SO₄ 消煮—凯氏定氮法测定,全磷采用 HNO₃-HF 消煮—钼锑抗比色法测定^[12]。微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸,硫酸钾浸提,总碳分析仪测定, K_{EC}=0.45^[14], K_{EN}=0.54^[15],其中,未熏蒸样品经硫酸钾浸提,总碳分析仪测定其中的有机碳和总氮含量为可溶性碳和可溶性氮^[16]。微生物生物量磷采用氯仿熏蒸,碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定, K_{EP}=0.4^[17],其中,未熏蒸样品经碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定其中的磷含量为可溶性磷。

表 1 样地概况
Table 1 Plot information

样地	坐标	海拔/m	退耕时间	地形	优势植物	植被高度/m	耕作	施肥
林地 F	23°23'39" N 107°23'23" E	246.20	2006年	坡地	茶条木(<i>Delavaya toxocarpa</i> Franch.) 芒草(<i>Arundinella nepalensis</i> Trin.)、 肾蕨(<i>Nephrolepis auriculata</i> (L.) Trimen)、 鬼针草(<i>Bidens pilosa</i> Linn.)	3.20	无耕作	无施肥
草地 G	23°23'28" N 107°23'24" E	196.33	2003年	坡改梯形 平地		0.50	无耕作	无施肥
甘蔗地 S	23°24'29" N 107°24'28" E	107.36	耕种至今	平地	甘蔗(<i>Saccharum officinarum</i> Linn.)	甘蔗宿根 零星出芽	2-3年翻耕 1次	甘蔗叶还田, 肥料量 N:P ₂ O ₅ :K ₂ O= 45:15:28 kg /亩/年 一年两季, 肥料量 N:P ₂ O ₅ :K ₂ O= 25:10:16 kg /亩/年
玉米地 M	23°22'33" N 107°23'32" E	329.80	耕种至今	平地	玉米(<i>Zea mays</i> L.)	玉米种子 零星出苗	1年翻耕 2次	

2.3 数据处理

数据采用 Excel 2010 整理, SPSS 20.0 进行统计分析, Origin 8.5 作图。图中数据均为均值±标准差 (n=3)。采用单因素方差分析(one way ANOVA, Tukey, P<0.05)比较不同数据的组间差异, 采用 Pearson 相关系数分析不同指标间的相关性(P<0.05)。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用方式土壤理化特征

不同土地利用方式土壤理化特征详见表 2。不同样地土壤容重没有显著差异, 但仍呈现出退耕草地<退耕林地<甘蔗地<玉米地的趋势。对于土壤团聚体组成, 退耕后林地和草地的大团聚体(42.82%,

57.11%)显著高于耕地的甘蔗地(16.94%)和玉米地(5.49%), 微团聚体(4.58%, 1.76%)则显著低于甘蔗地(12.42%)和玉米地(16.34%)。不同样地 pH 为 5.09~8.20, 其中, 林地、草地均显著高于甘蔗地和玉米地。与甘蔗地(103.39 mg·kg⁻¹、3.22 mg·kg⁻¹)和玉米地(105.02 mg·kg⁻¹、3.07 mg·kg⁻¹)相比, 退耕后林地和草地的速效氮显著提高到 156.55 mg·kg⁻¹和 166.49 mg·kg⁻¹, 而其速效磷则显著降低至 0.41 和 0.30 mg·kg⁻¹。

3.2 不同土地利用方式土壤有机碳全量及易利用组分特征

不同样地土壤有机碳全量及易利用组分的规律如图 1。各样地土壤有机碳含量为 15.89~34.12 g·kg⁻¹, 退耕后林地(34.12 g·kg⁻¹)和草地(32.45 g·kg⁻¹)较耕

表 2 不同样地土壤理化性质
Table 2 Soil physicochemical properties of different plots

样地	林地 F	草地 G	甘蔗地 S	玉米地 M
容重/g·cm ⁻³	1.10±0.12 a	1.09±0.05 a	1.20±0.12 a	1.29±0.04 a
大团聚体	42.82±0.42 a	57.11±10.98 a	16.94±2.74 b	5.49±0.95 b
小团聚体	39.70±3.50 ab	27.14±8.89 b	43.67±6.88 a	48.43±3.58 a
微团聚体	4.58±0.37 b	1.76±1.44 b	12.42±1.85 a	16.34±5.70 a
其他	12.90±3.64 b	13.99±0.94 ab	26.96±8.36 ab	29.74±8.19 a
pH	6.87±0.06 b	8.20±0.13 a	5.09±0.85 c	6.00±0.22 c
速效氮 /mg·kg ⁻¹	156.55±17.12 a	166.49±28.09 a	103.39±8.20 b	105.02±5.57 b
速效磷 /mg·kg ⁻¹	0.41±0.19 b	0.30±0.05 b	3.22±0.67 a	3.07±0.18 a

注: 不同字母表示同一指标不同样地在0.05水平差异显著。下同。
Note: Different letters indicate significant differences among plots at 0.05 level.The same below。

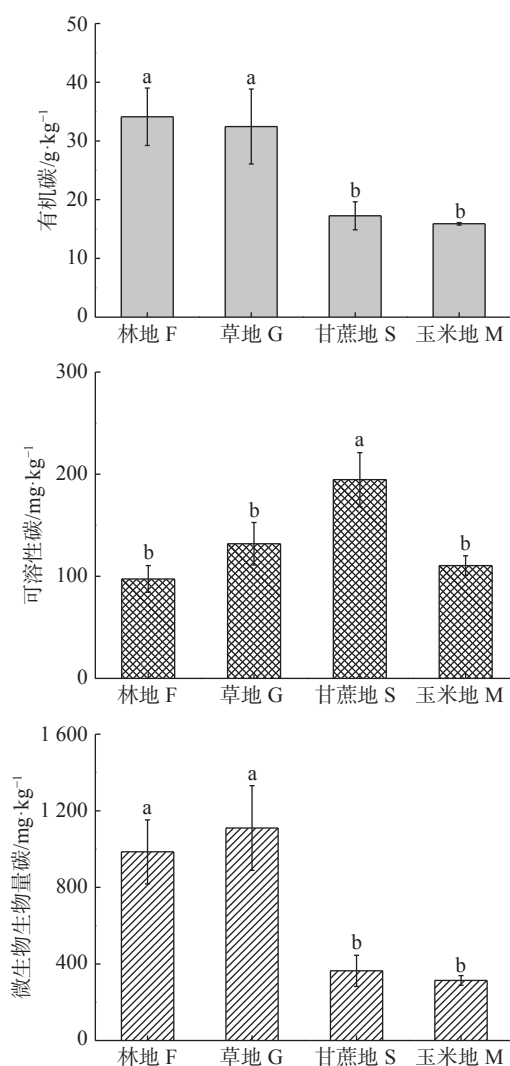


图1 不同样地土壤有机碳总量及易利用组分含量

注: 不同字母表示同一指标不同样地在 0.05 水平差异显著。下同。

Fig. 1 Contents of total and easy-to-use components of soil organic carbon in different plots

Note: Different letters indicate significant differences among plots at 0.05 level. The same below.

地显著提高, 分别是甘蔗地($17.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 1.98 和 1.88 倍, 分别是玉米地 ($15.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 2.15 和 2.04 倍。甘蔗地可溶性碳($194.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于林地、草地和玉米地。林地($985.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和草地($1110.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)土壤微生物生物量碳分别是甘蔗地($364.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 2.71 和 3.05 倍, 分别是玉米地($313.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 3.14 和 3.54 倍。

从可溶性碳、微生物生物量碳占有有机碳比例来看(表3), 甘蔗地的可溶性碳与有机碳之比最高, 为 1.14%, 退耕后草地和林地没有显著差异。对于微生物生物量碳与有机碳之比, 退耕后草地(3.54%)显著高于甘蔗地(2.09%)、玉米地(1.98%)。可溶性碳与

表3 不同样地土壤易利用碳组分占有有机碳比例/%

Table 3 Proportions of soil easy-to-use carbon components to the soil organic carbon in different plots/%

样地	可溶性碳/ 有机碳 DC/OC	微生物生物 量碳/有机碳 MBC/OC	(可溶性碳+微生物 生物量碳)/有机碳 (DC+MBC)/OC
林地 F	0.29±0.07 c	2.91±0.49 ab	3.20±0.55 a
草地 G	0.41±0.09 bc	3.54±1.17 a	3.95±1.27 a
甘蔗地 S	1.14±0.22 a	2.09±0.22 b	3.24±0.01 a
玉米地 M	0.70±0.06 b	1.98±0.17 b	2.67±0.13 a

注: DC-可溶性碳, MBC-微生物生物量碳, OC-有机碳。下同。

Note: DC-dissolved carbon, MBC-microbial biomass carbon, OC-organic carbon. The same below.

微生物生物量碳之和占有有机碳比例为 2.67%~3.95%, 但在各样地之间差异不显著。

3.3 不同土地利用方式土壤氮含量及易利用组分特征

不同样地土壤氮含量及易利用组分如图2。各样地土壤全氮为 $1.67 \sim 4.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 退耕后林地与草地显著高于耕地的甘蔗地和玉米地, 林地($4.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)分别是甘蔗地($1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和玉米地($1.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 2.48 和 2.19 倍, 草地($4.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)分别是甘蔗地和玉米地的 2.46 和 2.16 倍。各样地可溶性氮为 $25.11 \sim 33.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但各样地间差异不显著。各样地微生物生物量氮中, 草地($147.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于玉米地($43.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 玉米地仅为草地的 0.29。

不同样地土壤易利用氮组分占总氮比例如表4。耕地的甘蔗地(1.79%)和玉米地(1.64%)的可溶性氮与总氮之比显著高于退耕后林地(0.61%)和草地(0.81%)。各样地微生物生物量氮与全氮之比为 2.30%~3.60%, 样地之间没有显著差异。可溶性氮与微生物生物量氮之和占总氮比例甘蔗地(4.82%)显著高于林地(3.15%), 与其他样地差异不显著。

3.4 不同土地利用方式土壤磷含量及易利用组分特征

从图3可知, 退耕后草地的全磷最高, 为 $1.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 甘蔗地为 $0.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仅为草地的 0.48, 玉米地居中, 为 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。玉米地($8.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和甘蔗地($5.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的可溶性磷没有显著差异, 均显著高于退耕后的林地($1.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和草地($2.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。甘蔗地的微生物生物量磷显著高于玉米地, 林地和草地与甘蔗地和玉米地均没有显著差异。

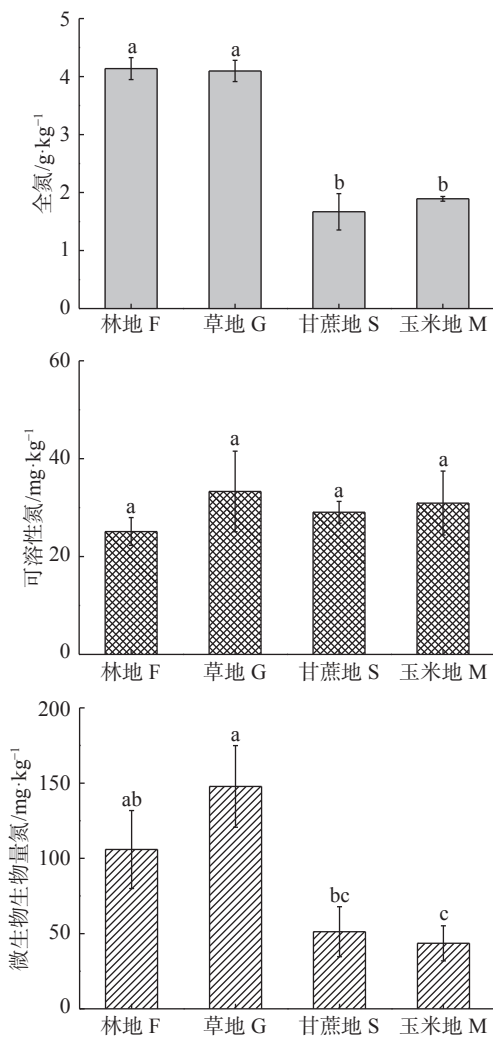


图 2 不同样地土壤氮含量及易利用组分含量

Fig. 2 Contents of total and easy-to-use components of soil nitrogen in different plots

表 4 不同样地土壤易利用氮组分占总氮比例/%

Table 4 Proportions of soil easy-to-use nitrogen components to the total nitrogen in different plots/%

样地	可溶性氮/ 全氮 DN/TN	微生物生物 量氮/全氮 MBN/TN	(可溶性氮+微生物 生物量氮)/全氮 (DN+MBN)/TN
林地 F	0.61±0.04 b	2.55±0.52 a	3.15±0.56 b
草地 G	0.81±0.18 b	3.60±0.56 a	4.41±0.74 ab
甘蔗地 S	1.79±0.41 a	3.03±0.48 a	4.82±0.40 a
玉米地 M	1.64±0.35 a	2.30±0.58 a	3.93±0.24 ab

注: DN-可溶性氮, MBN-微生物生物量氮, TN-全氮。下同。
Note: DN-dissolved nitrogen, MBC-microbial biomass nitrogen, TN-total nitrogen. The same below.

甘蔗地(1.18%)和玉米地(1.07%)的可溶性磷与全磷比例没有显著差异,而甘蔗地的微生物生物量

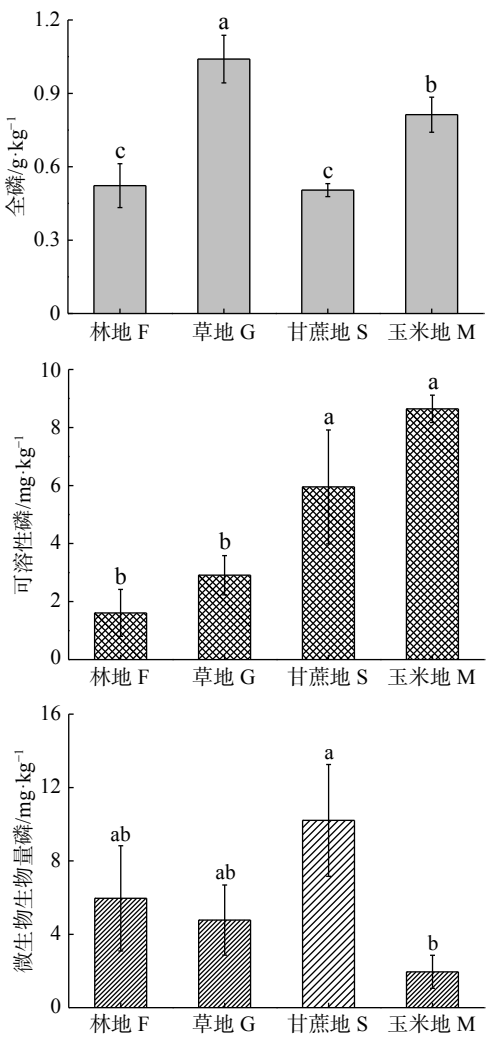


图 3 不同样地土壤磷含量及易利用组分含量

Fig. 3 Contents of total and easy-to-use components of soil phosphorus in different plots

表 5 不同样地土壤易利用磷组分占总磷比例/%

Table 5 Proportions of soil easy-to-use phosphorus componentsto the total phosphorus in different plots/%

样地	可溶性磷/ 全磷 DP/TP (%)	微生物生物 量磷/全磷 MBP/TP	(可溶性磷+微生物 生物量磷)/全磷 (DP+MBP)/TP
林地 F	0.31±0.14 b	1.23±0.83 ab	1.54±0.82 b
草地 G	0.28±0.09 b	0.45±0.13 bc	0.73±0.08 b
甘蔗地 S	1.18±0.36 a	2.03±0.61 a	3.20±0.24 a
玉米地 M	1.07±0.15 a	0.24±0.09 c	1.31±0.10 b

注: DP-可溶性磷, MBP-微生物生物量磷, TP-全磷。下同。
Note: DP-dissolved phosphorus, MBP-microbial biomass phosphorus, TP- total phosphorus. The same below.

磷(2.03%)显著高于玉米地(0.24%),退耕后的林地和草地之间均未有显著差异(表 5)。甘蔗地的可溶

性磷与微生物生物量磷之和占全磷比例最高,为3.20%,林地(1.54%)、草地(0.73%)和玉米地(1.31%)之间均未有显著差异。

3.5 不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征

不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征如表6。在土壤有机碳、氮、磷总量的生态化学计量比中,OC/TN在各样地间没有显著差异,OC/TP、

TN/TP均是退耕后林地(67.11、8.12)显著高于其他样地,而其他样地间没有显著差异。在土壤有机碳、氮、磷易利用组分的生态化学计量比中,MBC/MBN在各样地间没有显著差异,甘蔗地的DC/DN(6.68)显著高于其他样地,退耕林地的DC/DP(68.12)、DN/DP(17.76)显著高于玉米地(12.78、3.56),退耕草地的MBC/MBP、MBN/MBP分别是甘蔗地的7.16、6.73倍。

表6 不同样地土壤碳氮磷全量及易利用组分生态化学计量比

Table 6 Stoichiometry of total and easy-to-use components of carbon, nitrogen, and phosphorus of soil in different plots

样地	林地 F	草地 G	甘蔗地 S	玉米地 M
OC/TN	8.26±1.30 a	7.91±1.35 a	10.48±1.65 a	8.40±0.10 a
OC/TP	67.11±18.74 a	31.02±3.18 b	34.36±5.65 b	19.66±1.88 b
TN/TP	8.12±1.84 a	3.95±0.27 b	3.34±0.82 b	2.34±0.21 b
DC/DN	3.87±0.16 b	4.03±0.44 b	6.68±0.40 a	3.64±0.47 b
DC/DP	68.12±23.19 a	46.16±8.90 ab	34.70±10.29 ab	12.78±0.78 b
DN/DP	17.76±6.55 a	11.47±1.88 ab	5.19±1.44 b	3.56±0.60 b
MBC/MBN	9.42±0.65 a	7.50±0.32 a	7.26±0.85 a	7.45±1.30 a
MBC/MBP	180.97±51.39 ab	261.87±131.81 a	36.59±5.94 b	178.04±57.50 ab
MBN/MBP	19.05±4.36 ab	34.51±16.20 a	5.13±1.29 b	23.46±4.00 ab

3.6 不同土地利用方式土壤碳氮磷全量及易利用组分与土壤理化性质的关系

不同样地土壤碳、氮、磷全量及易利用组分与土壤理化性质的相关关系如表7。土壤pH、大团聚体、速效氮与土壤有机碳、微生物生物量碳、全氮、微生物生物量氮呈极显著正相关,与可溶性磷呈显著负相关。而土壤容重、微团聚体、速效磷与土壤有机碳、微生物生物量碳、全氮、微生物生物量氮呈显著负相关,与可溶性磷呈显著正相关。

4 讨论

4.1 土地利用方式对土壤有机碳及其易利用组分的影响

土壤有机碳是土壤的重要组成部分,土地利用方式转变对土壤有机碳影响很大。研究表明,退耕林地土壤有机碳较连续耕地显著增加^[18],退耕还林显著增强土壤的固碳能力。本研究中,退耕后林地和草地土壤有机碳显著高于耕地的甘蔗地和玉米地,一方面,林地和草地的枯枝落叶等地上凋落物、地下死亡根系和根系分泌物全部归还土壤,而甘蔗和玉

米收获后,仅残茬和根系归还土壤,耕地较林地、草地的土壤有机碳的返还量明显降低;另一方面,退耕还林还草减少了对土壤的扰动,有利于土壤微团聚体向大团聚体的转化,稳定的团聚体结构能够提高土壤有机碳固定并对其起到物理保护作用^[19],而农业耕作改变了土壤的通透性和孔隙度,土壤有机碳分解加快,土壤有机碳明显较低。本研究结果与张寒等^[18]的研究结果是一致的。也有研究表明,退耕草地土壤有机碳显著低于坡耕地^[7]。退耕草地(皇竹草)土壤有机碳显著低于坡耕地,而撂荒草地土壤有机碳显著高于坡耕地^[10]。多种退耕还林还草类型地块土壤有机质均显著高于坡耕地,而任豆则显著低于坡耕地^[20]。不同研究或同一研究中出现不同结果可能是由不同植被类型引起。

土地利用方式转变显著影响土壤微生物生物量碳和可溶性碳的变化。本研究中,退耕还林还草显著增加土壤微生物生物量碳,一方面,退耕后林地、草地土壤有机碳显著高于耕地的甘蔗地与玉米地,且土壤有机碳与土壤微生物生物量碳呈显著正相关^[19];另一方面,甘蔗地和玉米地剧烈的翻耕措施会导致土壤微生物区系变化和微生物量显著下降。在

表 7 不同样地土壤碳氮磷全量及易利用组分与土壤理化性质的相关关系

Table 7 Correlation among total and easy-to-use components of carbon, nitrogen, phosphorus of soil and soil physicochemical properties in different plots

	有机碳 OC	可溶 性碳 DC	微生物 生物量碳 MBC	全氮 TN	可溶 性氮 DN	微生物 生物量氮 MBN	全磷 TP	可溶 性磷 DP	微生物 生物量磷 MBP
容重	-0.702*	0.004	-0.707*	-0.647*	-0.091	-0.678*	-0.034	0.584*	-0.222
团聚体									
大团聚体	0.875**	-0.382	0.957**	0.965**	-0.028	0.866**	0.149	-0.875**	-0.035
小团聚体	0.371	-0.657*	0.193	0.406	-0.757**	0.009	-0.431	-0.452	-0.111
微团聚体	-0.649*	-0.117	-0.703*	-0.645*	-0.451	-0.700*	-0.318	0.614*	-0.114
其他	-0.204	-0.044	-0.253	-0.274	-0.058	-0.310	-0.287	0.152	0.117
pH	0.754**	-0.505	0.826**	0.851**	0.104	0.856**	0.664*	-0.659*	-0.264
速效氮	0.740**	-0.378	0.916**	0.871**	0.085	0.855**	0.239	-0.740**	-0.114
速效磷	-0.897**	0.530	-0.922**	-0.976**	0.077	-0.860**	-0.293	0.827**	0.179

注：*代表在0.05水平上显著相关，**代表在0.01水平上显著相关。

Note: * referring to a significant correlation at 0.05 level; ** referring to a significant correlation at 0.01 level.

广西北部环江山区，绝大部分退耕还林还草样地土壤的微生物生物量碳较坡耕地均有不同程度的提高^[11, 20]，这与本研究结论是一致的，但也有很少一部分，比如草地^[11]、任豆^[20]均与其参照的坡耕地没有显著差异，这可能与喀斯特地貌斑块化，植被生长具体生境地形不同有关^[21]。本研究中甘蔗地的可溶性碳显著高于其他样地，其原因是甘蔗地的甘蔗叶直接还田覆盖在地表，而本研究取样时期为 3 月末，退耕后林地、草地均处于生长期，并没有较多的有机物质归还土壤。

4.2 土地利用方式对土壤氮、磷全量及其易利用组分的影响

氮素是影响植物生长和生态系统生产力的重要限制因子。本研究中，退耕后林地和草地的全氮显著高于耕地的甘蔗地和玉米地，一方面，林地、草地的有机碳显著高于甘蔗地和玉米地，土壤碳、氮具有很好的耦合关系^[22]；另一方面，植被类型改变影响土壤的物理、化学、生物过程，进而影响土壤氮的转化^[23]。在广西环江的研究表明，次生林、灌草全氮显著高于耕地，而耕地显著高于草地^[11]，在贵州的研究表明，退耕林地、退耕草地与耕地的全氮没有显著差异^[24]，这可能与不同植物品种和不同耕地施肥措施有关。本研究中，不同样地的可溶性氮没有显著差异，草地的微生物生物量氮显著高于甘蔗地和玉米地，这可能与草地较甘蔗和玉米有更长的生长期和更大的地下生物量、地上凋落物量有关，植物能降低

土壤氮素的淋溶损失，通过根系分泌物和凋落物增加土壤碳、氮输入，促进微生物生长，增加微生物氮的固定^[25]。

磷是植物生长发育必需的营养元素，也是生态系统重要的限制因子。本研究中，退耕草地全磷显著高于退耕林地，其原因可能是草地磷素周转较快且为平地，林地周转较慢且为坡地，林地相对而言有较多的表层土壤随降水流失，已有研究也证实，磷素通常会成为亚热带森林生态系统的限制因子^[26]。玉米地全磷显著高于林地，玉米地和甘蔗地的可溶性磷均显著高于林地和草地，这主要是耕地均有磷肥施用所致。前人研究指出，连续耕地全磷较连续林地，退耕林地高^[18]，这与本研究结论是一致的。甘蔗地的微生物生物量磷显著高于玉米地，其原因可能是甘蔗地表面覆有未完全分解的甘蔗叶，为微生物提供了更多的碳源，微生物数量和活性相对更高。

5 结 论

(1) 耕地转变为林地、草地后，研究区喀斯特土壤理化性质得到明显改善。与连续耕种的甘蔗地和玉米地相比，退耕后林地和草地土壤 pH 升高，大团聚体、速效氮显著增加，微团聚体、速效磷显著减少。

(2) 耕地转变为林地、草地后，研究区喀斯特土壤碳、氮、磷全量及易利用组分发生显著改变。退耕后林地和草地土壤有机碳显著提高，林地(34.12

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和草地($32.45\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别是甘蔗地($17.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 1.98 和 1.88 倍,分别是玉米地($15.89\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 2.15 和 2.04 倍。林地和草地的土壤微生物生物量碳、全氮均显著提高,微生物生物量氮也明显提高。对于磷素,草地全磷($1.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)最高,其次玉米地($0.81\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),林地与甘蔗地最低,且甘蔗地和玉米地的可溶性磷均显著高于林地和草地。在土壤碳、氮、磷生态化学计量比方面,林地的 OC/TP、TN/TP 显著高于草地和耕地,而草地和耕地没有显著差异。

(3) 土壤理化性质显著影响研究区喀斯特土壤碳、氮、磷全量及易利用组分特征。土壤容重、团聚体结构、pH、速效氮、速效磷都与土壤碳、氮、磷全量与易利用组分有着显著的相关关系。

综上所述,退耕还林还草、转变土地利用方式显著提高了喀斯特土壤碳、氮水平,提升了土壤质量,退耕还林还草、转变土地利用方式是喀斯特地区石漠化治理、生态环境保护的重要、有效途径。

参考文献

- [1] GUO Jing, WANG Bo, WANG Guibin, WU Yaqiong, CAO Fuliang. Vertical and seasonal variations of soil carbon pools in ginkgo agroforestry systems in Eastern China[J]. *Catena*, 2018, 171: 450-459.
- [2] Chatterjee A, Cooper K, Klaustermeier A, Awale R, Cihacek L J. Does crop species diversity influence soil carbon and nitrogen pools?[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108: 427-432.
- [3] SUN Long, HU Tongxin, KIM Jihong, GUO Futao, SONG Hong, LV Xinshuang, HU Haiqing. The effect of fire disturbance on short-term soil respiration in typical forest of Greater Xing'an Range, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(3): 613-620.
- [4] 伏文兵, 严友进, 李华林, 林桂恒, 胡刚, 黄朝海. 岩溶槽谷石漠化综合治理区治理生态效益评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(7): 146-156.
FU Wenbing, YAN Youjin, LI Hualin, LIN Zhihuan, HU Gang, HUANG Chaohai. Evaluation of ecological benefits of comprehensive management of rocky desertification in karst trough valleys[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(7): 146-156.
- [5] 王韵, 王克林, 邹冬生, 李林, 陈志辉. 广西喀斯特地区植被演替对土壤质量的影响[J]. *水土保持学报*, 2007(6): 130-134.
WANG Yun, WANG Kelin, ZOU Dongsheng, LI Lin, CHEN Zhihui. Effects of vegetation succession on soil quality in karst region of Guangxi, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007(6): 130-134.
- [6] 蓝芙宁, 李衍青, 赵一, 朱同彬, 蒋忠诚, 吴华英, 朱秀群, 侯士田. 放牧对峰丛洼地植物-土壤 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 742-751.
- LAN Funing, LI Yanqing, ZHAO Yi, ZHU Tongbin, JIANG Zhongcheng, WU Huaying, ZHU Xiuqun, HOU Shitian. Influence of grazing on characteristics of chemical metrology for C, N and P in plants and soil of peak-cluster depressions[J]. *Carso-logica Sinica*, 2018, 37(5): 742-751.
- [7] 文小琴, 舒英格, 何欢. 喀斯特山区土地不同利用方式的土壤养分及微生物特征[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(6): 1227-1233.
WEN Xiaoqin, SHU Yingge, HE Huan. Soil nutrients and microbial characteristics under different land utilization patterns in karst mountainous area[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(6): 1227-1233.
- [8] 孙彩丽, 王艺伟, 王从军, 黎庆菊, 吴志红, 袁东昇, 张健利. 喀斯特山区土地利用方式转变对土壤酶活性及其化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 4140-4149.
SUN Caili, WANG Yiwei, WANG Congjun, LI Qingju, WU Zhihong, YUAN Dongsheng, ZHANG Jianli. Effects of land use conversion on soil extracellular enzyme activity and its stoichiometric characteristics in karst mountainous areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 4140-4149.
- [9] 钱前, 章润阳, 刘坤平, 梁月明, 张伟, 潘复静. 喀斯特不同土地利用方式和生态恢复模式的土壤磷素特征[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(11): 2128-2136.
QIAN Qian, ZHANG Runyang, LIU Kunping, LIANG Yueming, ZHANG Wei, PAN Fuming. Soil phosphorus characteristics of different land use and ecological restoration types in karst ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(11): 2128-2136.
- [10] 白义鑫, 盛茂银, 肖海龙, 胡琪娟. 典型石漠化治理措施对土壤有机碳、氮及组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 170-177+185.
BAI Yixin, SHENG Maoyin, XIAO Hailong, HU Qijuan. Effects of typical rocky desertification control measures on soil organic carbon, nitrogen, and components[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 170-177+185.
- [11] 黄娟, 邓羽松, 韦慧, 林立文, 黄海梅, 付智勇. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型土壤微生物量碳氮磷和养分特征[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 605-612.
HUANG Juan, DENG Yusong, WEI Hui, LIN Liwen, HUANG Haimei, FU Zhiyong. Characteristics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus, and nutrients in different vegetation types in karst peak-cluster depression[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3): 605-612.
- [12] 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.
LU Rukun. Analytic methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [13] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil*

- Science Society of America Journal, 1993, 57: 1070-1076.
- [14] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19: 703-707.
- [15] Brookes P C, Kragt J F, Powlson D S, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: The effects of fumigation time and temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17: 831-835.
- [16] KOU Xinchang, SU Tongqing, MA Ningning, LI Qi, WANG Peng, WU Zhengfang, LIANG Wenju, CHENG Weixin. Soil micro-food web interactions and rhizosphere priming effect[J]. *Plant and Soil*, 2018, 432: 129-142.
- [17] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14: 319-329.
- [18] 张寒, 吴琳娜, 欧阳坤长, 冯紫薇. 喀斯特地区河岸土壤碳磷对土地利用演变的响应[J]. *人民长江*, 2022, 53(8): 50-57.
- ZHANG Han, WU Linna, OUYANG Kunchang, FENG Ziwei. Responses of riparian soil carbon and phosphorus to land use evolution in karst area[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(8): 50-57.
- [19] 田慎重, 张玉凤, 边文范, 董亮, Jiafa Luo, 郭洪海. 深松和秸秆还田对旋耕农田土壤有机碳活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 185-192.
- TIAN Shenzhong, ZHANG Yufeng, BIAN Wenfan, DONG Liang, Jiafa Luo, GUO Honghai. Effects of subsoiling and straw return on soil labile organic carbon fractions in continuous rotary tillage cropland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(2): 185-192.
- [20] 鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 王克林. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2390-2399.
- LU Shiyang, PENG Wanxia, SONG Tongqing, ZENG Fuping, DU Hu, WANG Kelin. Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between karst hills[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2390-2399.
- [21] 薛飞, 龙翠玲, 廖全兰, 熊玲. 喀斯特森林凋落物对土壤养分及土壤酶的影响[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(5): 449-458.
- XUE Fei, LONG Cuiling, LIAO Quanlan, XIONG Ling. An analysis of litter, soil, stoichiometry, and soil enzymes in karst forest[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, 40(5): 449-458.
- [22] 王海珍, 陆宇明, 张磊, 李啸灵, 林伟盛, 郭剑芬. 采伐剩余物不同处理方式对杉木幼林土壤有机氮组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1199-1206.
- WANG Haizhen, LU Yuming, ZHANG Lei, LI Xiaoling, LIN Weisheng, GUO Jianfen. Effects of harvest residue management on soil organic nitrogen fractions in young Cunninghamia lanceolata plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1199-1206.
- [23] 张萍, 章广琦, 赵一婷, 彭守璋, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同森林类型叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5087-5098.
- ZHANG Ping, ZHANG Guangqi, ZHAO Yiping, PENG Shouzhong, CHEN Yunming, CAO Yang. Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil interactions in different forest types in the Loess hilly-gully region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 5087-5098.
- [24] 陈超, 杨丰, 赵丽丽, 姚红艳, 王建立, 刘洪来. 贵州省不同土地利用方式对土壤理化性质及其有效性的影响[J]. *草地学报*, 2014, 22(5): 1007-1013.
- CHEN Chao, YANG Feng, ZHAO Lili, YAO Hongyan, WANG Jianli, LIU Honglai. Influences of different land use types on soil characteristics and availability in karst area, Guizhou Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(5): 1007-1013.
- [25] CHENG Xiaoli, YANG Yuanhe, LI Ming, DOU Xiaolin, ZHANG Quanfa. The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou reservoir area of China[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366: 415-424.
- [26] FAN Yuexin, LIN Fang, YANG Liuming, ZHONG Xiaojian, WANG Minhuang, ZHOU Jiacong, CHEN Yuehmin, YANG Yusheng. Decreased soil organic P fraction associated with ectomycorrhizal fungal activity to meet increased P demand under N application in a subtropical forest ecosystem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54: 149-161.

Effect of land utilization patterns on total and easy-to-use components of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the karst area of Pingguo, Guangxi

SU Tongqing¹, CUI Tingting¹, ZHANG Jianbing¹, LUO Weiqun^{2,3}, HU Baoqing¹

(1. Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamic, MNR & GZAR, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Pingguo National Field Observation and Research Station of Karst Ecosystem in Guangxi, Pingguo, Guangxi 531400, China)

Abstract Soil carbon, nitrogen and phosphorus are important factors of soil quality, which play important roles in increasing soil nutrient storage, improving soil fertility and promoting plant growth. A large number of studies have shown that returning cultivated land back to forest and grassland and converting land use patterns will lead to changes

in soil nutrient status and stoichiometry. However, systematic studies on total and easy-to-use components of soil carbon, nitrogen, and phosphorus are relatively few in Pingguo karst area of Youjiang River Valley in central Guangxi.

In this study, plots of three types of land use (the restored forest and grassland from cultivated land and cultivated land for sugarcane and maize) inside and near Pingguo National Field Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Guangxi were taken as research objects, and 0-15 cm surface soil was sampled in March, 2021. The physical and chemical properties of soil, total and easy-to-use components of carbon, nitrogen and phosphorus and their relationships were analysed in order to better understand the effects of returning cultivated land back to forest and grassland and converting land utilization patterns on total and easy-to-use components of carbon, nitrogen and phosphorus of soil in karst areas. The results showed as follows: 1) Compared to cultivated land, the soil pH values of the restored forest and grassland from cultivated land increased significantly. The macro-aggregates of restored forest and grassland (42.82%, 57.11% respectively) were significantly higher than those of cultivated land for sugarcane (16.94%) and maize (5.49%), and their micro-aggregates (4.58%, 1.76% respectively) were significantly lower than those of cultivated land for sugarcane (12.42%) and maize (16.34%). Meanwhile, compared to cultivated land for sugarcane ($103.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $3.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and that for maize ($105.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $3.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), available nitrogen of restored forest and grassland significantly increased to 156.55 and $166.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, while available phosphorus significantly decreased to 0.41 and $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. 2) Compared to cultivated land, the organic carbon, microbial biomass carbon and total nitrogen of soil in restored forest and grassland increased significantly. The values of soil organic carbon of restored forest and grassland ($34.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $32.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively) were 1.98 and 1.88 times of cultivated land for sugarcane ($17.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and 2.15 and 2.04 times of cultivated land for maize ($15.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), respectively. The values of microbial biomass carbon of soil in restored forest and grassland ($985.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1,110.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively) were 2.71 and 3.05 times of cultivated land for sugarcane ($364.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and 3.14 and 3.54 times of cultivated land for maize ($313.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), respectively. The values of total nitrogen of soil in restored forest and grassland ($4.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $4.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively) were 2.48 and 2.46 times of cultivated land for sugarcane ($1.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and 2.19 and 2.16 times of cultivated land for maize ($1.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), respectively. The total value of phosphorus in restored grassland was the highest ($1.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), followed by that of cultivated land for maize ($0.81 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and the values of dissolved phosphorus of cultivated land for sugarcane and maize were significantly higher than those of restored forest and grassland. The values of stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus, OC/TP, TN/TP of soil in restored forest were significantly higher than those of restored grassland and cultivated land, and the values of restored grassland and cultivated land did not show significant difference. 3) Soil bulk density, aggregate structure, pH value, available nitrogen and available phosphorus were significantly correlated with total and easy-to-use components of carbon, nitrogen and phosphorus of soil. Properly speaking, soil pH value, large macro-aggregates, and available nitrogen showed a significantly positive correlation with organic carbon, microbial biomass carbon, total nitrogen and microbial biomass nitrogen of soil, and a significantly negative correlation with dissolved phosphorus. Meanwhile, bulk density, micro-aggregates, and available phosphorus of soil showed a significantly negative correlation with organic carbon, microbial biomass carbon, total nitrogen and microbial biomass nitrogen of soil, and a significantly positive correlation with dissolved phosphorus. The results indicated that the measures of returning cultivated land back to forest and grassland and converting land use patterns significantly improved soil carbon, nitrogen and soil quality in karst areas. These two measures are important and effective ways to control rocky desertification and protect ecological environment in karst areas.

Key words land utilization patterns, Guangxi Pingguo, karst, carbon, nitrogen, phosphorus

(编辑 杨杨 张玲)