

陈秋帆, 卢琦, 王妍, 等. 西南石漠化区林下土壤养分特征及差异性[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 290-300.
DOI: 10.11932/karst2022y24

西南石漠化区林下土壤养分特征及差异性

陈秋帆¹, 卢琦^{1,3}, 王妍^{1,2}, 刘云根^{1,2}

(1. 西南林业大学石漠化研究院, 云南昆明 650224; 2. 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南昆明 650224; 3. 中国林业科学研究院, 北京 100009)

摘要: 文章采用文献检索法收集 20 世纪 90 年代以来石漠化区植被修复和土壤研究相关论文, 以全国二次土壤普查养分分级标准为基础, 探讨林下土壤养分改良情况及土壤化学计量特征。结果表明: (1) 中国西南石漠化区林下土壤总有机碳、全氮均值均高于全国二次土壤普查养分一等级, 全磷处于二级范围, 土壤养分改善效果明显, 而全钾含量属于五级低钾区; (2) 广西壮族自治区总有机碳和全氮均值为五省(区、市)第一, 全磷和全钾位于二等级和四等级, 土壤养分含量增加最明显; 贵州省总有机碳、全氮高于一等级 34% 和 37%, 全磷值在二等级范围, 全钾值位于第五等级, 贵州省石漠化林下土壤养分改良明显; 云南省总有机碳、全磷指标分别高于一等级 9%、21%, 全氮属于二等级, 全钾属于五等级, 土壤养分指标有不同程度提高; 重庆市总有机碳高于一等级 1.75%, 全氮和全磷属于二等级, 全钾为五省中最高且属于四级, 土壤养分指标改良较其他三省慢; 湖南省总有机碳指标为二等级, 全氮、全磷、全钾值分别属于二等级、五等级、五等级, 湖南省需加强石漠化治理的力度; (3) 西南石漠化区土壤总有机碳和全氮指标呈正相关, 植被生长亦受钾元素限制。其中, 广西壮族自治区总有机碳、全氮和全磷存储快, 土壤改良效益极其显著; 贵州省土壤固碳能力高于全国平均值; 云南省石漠化地区土壤钾元素偏低, 影响植被生长; 重庆市土壤中全钾含量高与总有机碳、全氮、全磷关系不大, 氮元素成为限制植物生长的元素; 湖南省植被生长需补充磷、钾元素。西南石漠化区植被生长应充分补充钾元素, 除此之外, 湖南、重庆需加强磷、氮元素的补充; 云南、湖南、重庆应借鉴广西壮族自治区生态修复经验, 加强石漠化生态治理并发挥效益。

关键词: 石漠化; 西南五省(区、市); 植被修复; 土壤养分; 化学计量比

中图分类号: X173 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)02-0290-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

石漠化是脆弱的喀斯特环境背景下, 受人类不合理社会经济活动干扰破坏所造成的土壤侵蚀严重、基岩大面积裸露、土地生产力下降、地表出现类似荒漠景观的土地退化过程^[1]。截至 2016 年底, 中国喀斯特石漠化土地总面积为 1 007 万 hm^2 , 占区域国土面积的 9.4%, 集中于贵州、云南、广西、湖南和重

庆, 五省(区、市), 分别占全国石漠化土地总面积的 24.5%、23.4%、15.2%、12.4% 和 7.7%, 总百分比 83.2%^[2]。大面积石漠化区域使生态环境进一步恶化, 陷入生境和贫困的恶性循环, 衍生出新一类“生态灾民”, 成为第四大地质生态灾难区^[3]。

20 世纪 90 年代以来, 在早期开展石漠化现状、成因分析到石漠化区生态治理的基础上, 石漠化相关研究在时间和空间上愈加精细化^[4]。石漠化治理

基金项目: 国家自然科学基金(31760245, 31660139)

第一作者简介: 陈秋帆(1991—), 女, 博士研究生, 研究方向为石漠化治理。E-mail: 260961355@qq.com。

收稿日期: 2022-03-30

技术由简单的封山育林到植被生态修复逐渐发展起来,开展了石漠化适生植被物种筛选与培育、人工诱导栽培、耐旱植被群落优化配置、植被复合经营、石漠化复合型立体生态农业发展等生态修复治理模式的相关研究^[5-8],其结果表明植被由灌草丛向森林演替极大促进了森林区域内土壤的恢复^[9],岩石极度裸露的石漠化区,土壤理化性质如全氮、全磷、全钾和有机质等在很大程度上受地面植物的影响;植物群落、土壤性质和功能之间存在非常复杂的关系,形成植物和土壤的反馈机制^[10-12]。许多研究都探析了植被对石漠化区土壤养分的影响,石漠化区植被恢复后土壤表层植被覆盖的变化影响到土壤性质;有部分研究表明树木会从土壤中吸收大量的养分,从而导致土壤养分浓度降低^[13-14];有研究表明草地恢复造林 10 年后,全钾略有增加,但土壤有机质、全氮、全磷的含量均呈下降趋势^[15];也有研究表明土壤全钾、速效钾随植被由草、灌丛幼林向森林的变化呈现下降趋势,且森林中土壤全钾、速效钾浓度明显低于草地^[16]。在石漠化区植被恢复过程中,由于生物量的积累和物种的变化,土壤中氮、磷和钾的储量会减少,但土壤性质变化的程度取决于土壤养分积累与分解的平衡,水土流失和径流增加或减少的程度以及岩石矿化或浸出的速率比^[17-18]。在西南石漠化区实施植被修复与保护之后,林下土壤养分的总体演变趋势与特征鲜有报道。本文采用文献计量统计分析法,以全国二次土壤普查养分分级标准为基础,探讨中国西南主要石漠化省(区、市)实施植被修复后的土壤养分情况及土壤化学计量特征比,以期为中国石漠化生态治理提供数据支撑和技术参考。

1 研究方法

1.1 文献搜集与整理

从公开发表的文献中检索 20 世纪 90 年代以来中国典型石漠化植被修复下土壤总有机碳(TOC)、全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)量化指标。检索依据为:(1)以中文关键词“石漠化(喀斯特或岩溶区)、植被修复(植树造林或森林)、土壤”和英文关键词“rocky desertification(karst)、vegetation restoration(afforestation or woodland)、soil”为关键词在各大数据库(中国知网、万方、维普和 Science

Direct、Web of Science、Springer 等)检索目标文献;(2)检索到的目标文献,同一篇目标文献有多个不同取样地,拆分为不同样本;贵州目标文献 32 篇,广西壮族自治区(简称广西)目标文献 15 篇,云南目标文献 8 篇,重庆目标文献 6 篇,湖南目标文献 9 篇;除此之外,云南额外增加 9 个样本,来源于课题组野外采样室内试验获得数据;(3)文献量化指标 TOC、TN、TP、TK 用算术平均值表示,单位都为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;(4)土壤 TOC、TN、TP、TK 指标等级划分依据《全国二次土壤普查养分分级标准》。

1.2 数据整理与分析

采用以下几点为依据进行数据归纳整理:(1)目标文献对植被修复区土壤 TOC、TN、TP、TK 指标有直接量化值的则直接引用;目标文献中未对调查区域土壤 TOC、TN、TP、TK 指标作直接表述的,通过文献中图表获得;(2)原始数据处理分析采用 EXCEL、SPSS9 分析,用 Origin95、R 语言 ggplot2 软件包完成图像制作。

2 结果与分析

2.1 西南石漠化区林下土壤养分特征分析

2.1.1 土壤养分整体特征

从表 1、图 1 可知,西南喀斯特区植被修复后土壤 TOC、TN、TP、TK 指标经 Kolmogorov-Smirnov 检验均符合正态分布,土壤 TOC、TN、TP、TK 指标范围分别为 $5.23\sim 151.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.26\sim 8.28\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.03\sim 4.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.21\sim 36.36\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,集中区间为 $30\sim 50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.75\sim 2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.25\sim 0.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2\sim 12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为 $46.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $9.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤 TOC、TN 均值均高于全国二次土壤普查养分分级标准的一级,TP 处于二级范围区,土壤养分状况较好,反映出经植被修复后喀斯特区土壤养分改善极大,但 TK 含量属于标准范围五级低钾区。石漠化植被恢复区统筹规划,因地制宜,以植被修复与保护为原则,开展规模化示范与技术集成,治理后土壤养分极大改善^[19-20]。同时植被恢复后 TOC 增量明显,高于全国土壤养分标准等级一级 15.6%。从 TN 增量看,高于全国土壤养分标准等级一级 28%,土壤 TN 增加主要来源于氮沉降和凋落物分解,已有

表 1 西南石漠化植被修复下土壤 TOC、TN、TP 和 TK 的植被恢复 of rocky desertification areas in Southwest China
 Table 1 Concentration of soil TOC, TN, TP and TK under the vegetation restoration of rocky desertification areas in Southwest China

区域	TOC样 本数	TOC范围/ g·kg ⁻¹	TOC平均值/ g·kg ⁻¹	TN样/ 本数	TN范围/ g·kg ⁻¹	TN平均值/ g·kg ⁻¹	TP样 本数	TP范围/ g·kg ⁻¹	TP平均值/ g·kg ⁻¹	TK样 本数	TK范围/ g·kg ⁻¹	TK平均值/ g·kg ⁻¹
南部	3	(29.98~40.76)	36.57	3.00	(1.56~1.79)	1.69	3.00	(0.29~0.45)	0.35	3.00	(1.72~2.11)	1.93
	14	(32.51~64.8)	47.40	14.00	(1.14~5.19)	3.39	14.00	(0.65~1.50)	1.08	14.00	(2.59~11.78)	7.73
	6	(16.79~94.06)	41.37	6.00	(1.07~3.721)	2.01	5.00	(0.62~3.66)	1.47	6.00	(7.68~17.354)	12.19
贵州	13	(5.23~95.80)	49.18	14.00	(0.26~4.84)	2.48	14.00	(0.10~1.59)	0.59	9.00	(1.57~19.16)	8.86
	2	(43.14~50.72)	46.93	2.00	(2.66~2.85)	2.76	2.00	(0.64~0.87)	0.76	2.00	(12.45~15.2)	13.83
	3	(54.72~79.33)	67.28	4.00	(3.86~5.77)	4.55	4.00	(0.45~0.73)	0.61	4.00	(8.53~11.25)	10.37
西部	9	(17.69~104.12)	53.96	9.00	(1.41~2.87)	1.68	6.00	(0.33~4.67)	1.31	8.00	(4.38~8.93)	5.80
	4	(26.39~100.6)	58.03	4.00	(1.76~5.45)	3.53	4.00	(0.63~1.38)	1.03	4.00	(7.21~18.93)	10.27
	3	(36.45~80.95)	57.05	3.00	(2.25~4.43)	3.20	3.00	(0.67~0.75)	0.70	3.00	(2.85~11.48)	5.85
中部	4	(56.09~92.88)	79.46	4.00	(0.47~4.38)	2.86	6.00	(0.31~0.65)	0.47	4.00	(0.40~19.49)	9.43
	8	(19.46~62.45)	36.36	8.00	(1.16~2.50)	1.64	8.00	(0.13~0.93)	0.53	5.00	(7.63~14.33)	11.51
	4	(43.34~93.90)	69.69	4.00	(2.57~4.09)	3.14	4.00	(0.34~2.85)	1.06	2.00	(3.69~18.70)	11.20
广西	9	(36.8~131.72)	59.30	9.00	(1.42~6.75)	2.83	9.00	(0.2~1.05)	0.84	9.00	(3.61~8.99)	6.39
	45	(9.87~151.87)	59.56	44.00	(1.31~8.28)	4.15	44.00	(0.23~2.46)	1.08	41.00	(1.75~16.90)	7.33
	12	(10.97~112.40)	54.08	12.00	(0.92~7.20)	3.98	11.00	(0.31~1.70)	0.97	1.00	16.95	16.95
云南	15	(20.81~125.88)	64.83	16.00	(0.95~7.13)	4.11	16.00	(0.31~2.25)	1.02	16.00	(0.52~14.33)	8.79
	9	(14.09~21.99)	18.50	9.00	(0.74~2.49)	1.31	9.00	(1.70~1.89)	1.82	9.00	(1.38~2.14)	1.75
	22	(11.67~129.7)	47.48	21.00	(0.29~6.18)	2.70	22.00	(0.03~2.50)	0.80	19.00	(0.21~15.00)	11.09
湖南	22	(10.36~115.81)	40.70	21.00	(0.40~3.64)	1.97	20.00	(0.30~1.17)	0.71	20.00	(0.91~36.36)	13.44
	25	(8.09~85.04)	36.00	22.00	(0.92~2.64)	1.76	24.00	(0.18~0.88)	0.37	21.00	(1.91~15.4)	5.86
全国总计	232	(5.23~151.87)	46.31	229	(0.26~8.28)	2.56	228	(0.03~4.64)	0.82	200	(0.21~36.36)	9.16

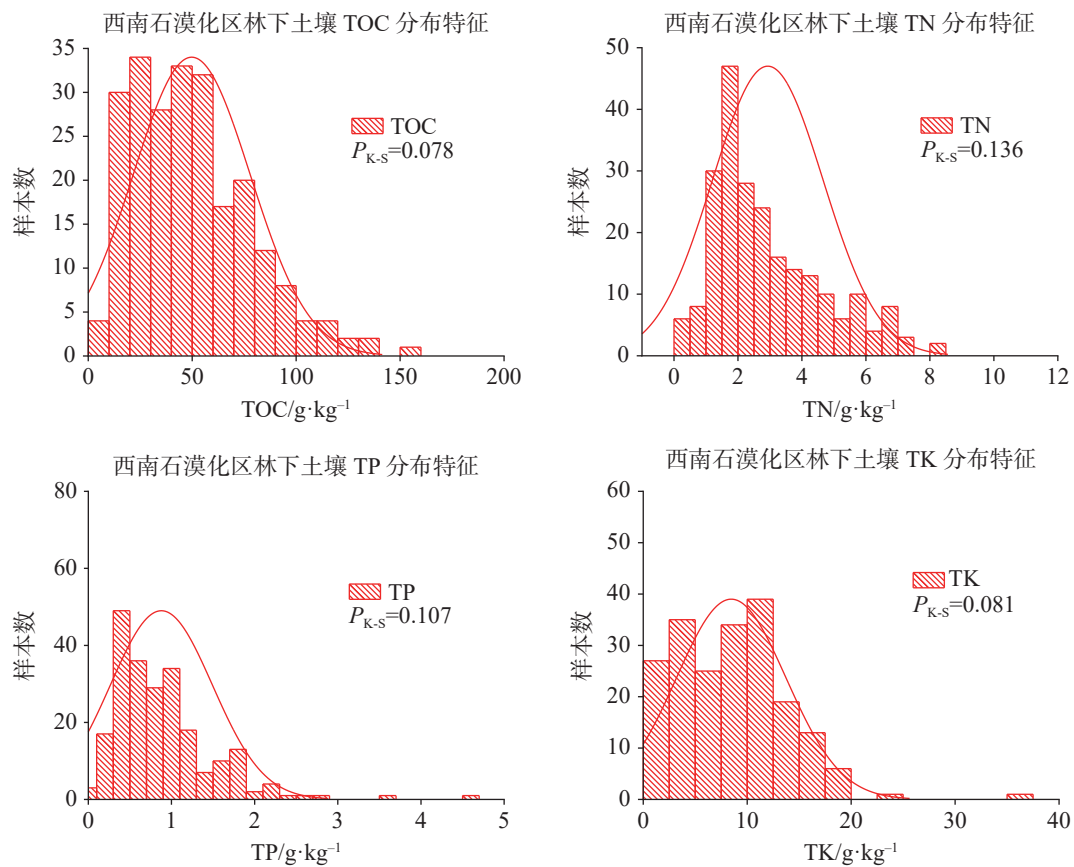


图 1 西南石漠化区植被修复土壤 TOC、TN、TP、TK 含量分布特征 (PK-S>0.05 表示呈正态分布)

Fig. 1 Soil distribution characteristics of TOC, TN, TP, and TK under the vegetation restoration of rocky desertification areas in Southwest China (PK-S>0.05 indicates normal distribution.)

研究表明,经由大气沉降进入到森林生态系统中的外源氮不到 1% 被植物利用,绝大部分均被固定在土壤中^[21]。但在石漠化区高钙偏碱性特殊背景下土壤对大气和凋落物两者氮素矿化、硝化和反硝化相互转换速度、通量的响应机制是否与非石漠化区域不同,此问题将是氮沉降研究的重点^[22]。植被恢复下土壤养分 TP 含量也有所增加,高于全国土壤养分标准等级二级 2.5%,植物凋落物对土壤养分指标影响较大, Vincent 等^[23] 研究表明,去除 3 年的凋落物使矿质土壤表层 2 cm 的有机磷浓度降低了 23%,而添加凋落物使其增加 16%;增加凋落物投入有可能增加热带森林土壤溶液中的磷浓度^[24]。TK 含量依然位于全国养分等级五级低钾范围,来自《2016 年全国耕地质量监测报告》公布华南区及长江中下游部分地区 TK 含量相对缺乏,均低于 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,中国西南地区存在 TK 匮乏的背景,同时钾元素累计速率慢也是导致 TK 含量低的原因, Johnson 应用“反向示踪技术”于纽约红松砂土,认为在一个有 43 年历史的人工林中,60% 的叶片中钾含量可归因于

9 年前施用的钾肥。同样,在一个 46 年的种植园中,35%~40% 的叶片中钾含量可能来自 23 年前施的钾肥^[25]。

2.1.2 西南五省(区、市)差异性

五个省(区、市)各个土壤养分指标之间差异显著($P=0.05\%$ 水平),均呈正态分布($PK-S>0.05$)(表 2),各个省(区、市)土壤养分指标各有特点(图 2)。

广西壮族自治区 TOC 和 TN 含量均值都排五省(区、市)第一,分别为 $57.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $3.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 TOC 和 TN 含量均高于全国土壤养分等级一等的 44% 和 82.5%,TP 和 TK 均值分别为 $0.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,位于全国土壤养分等级的二级和四级,养分含量增加明显。石漠化区植被的生态修复对土壤养分改良效益显著,这主要源于广西壮族自治区 20 世纪 80 年代开始的石漠化区生态修复工作,其采取“封山育林、造林补植、改燃节柴、石缝造植”等措施,加快了造林绿化步伐,截止 2018 年,广西森林面积达 1 480 万 hm^2 ,森林覆盖率为 62.37%,活立木

表 2 不同省(区、市)植被修复石漠化土壤养分指标含量 (PK-S>0.05 表示呈正态分布)
Table 2 Soil nutrient indicators under the vegetation restoration in the rocky desertification areas of different province/regions/cities (Pk-S>0.05 indicates normal distribution)

区域	TOC				TN				TP				TK			
	样点 数	分区 类型	集中 区间	PK-S	样点 数	分区 类型	集中 区间	PK-S	样点 数	分区 类型	集中 区间	PK-S	样点 数	分区 类型	集中 区间	PK-S
贵州	73	正态分布	40~60	0.078	75	正态分布	1~2	0.136	73	正态分布	0.4~0.8	0.107	64	正态分布	7.5~12.5	0.081
广西	66	正态分布	40~80	0.078	65	正态分布	1.5~2.5	0.146	64	正态分布	0.8~1.2	0.129	51	正态分布	2.5~7.50	0.113
云南	46	正态分布	20~60	0.100	46	正态分布	1.5~2	0.141	47	正态分布	0.6~0.8	0.182	44	正态分布	10~15	0.289
重庆	22	正态分布	20~40	0.169	21	正态分布	1.5~2.0	0.138	20	正态分布	0.2~1.0	0.120	20	正态分布	7.5~17.5	0.145
湖南	25	正态分布	10~30	0.232	22	正态分布	1.5~2.0	0.181	24	正态分布	0.2~0.4	0.176	21	正态分布	2.5~5.0	0.264

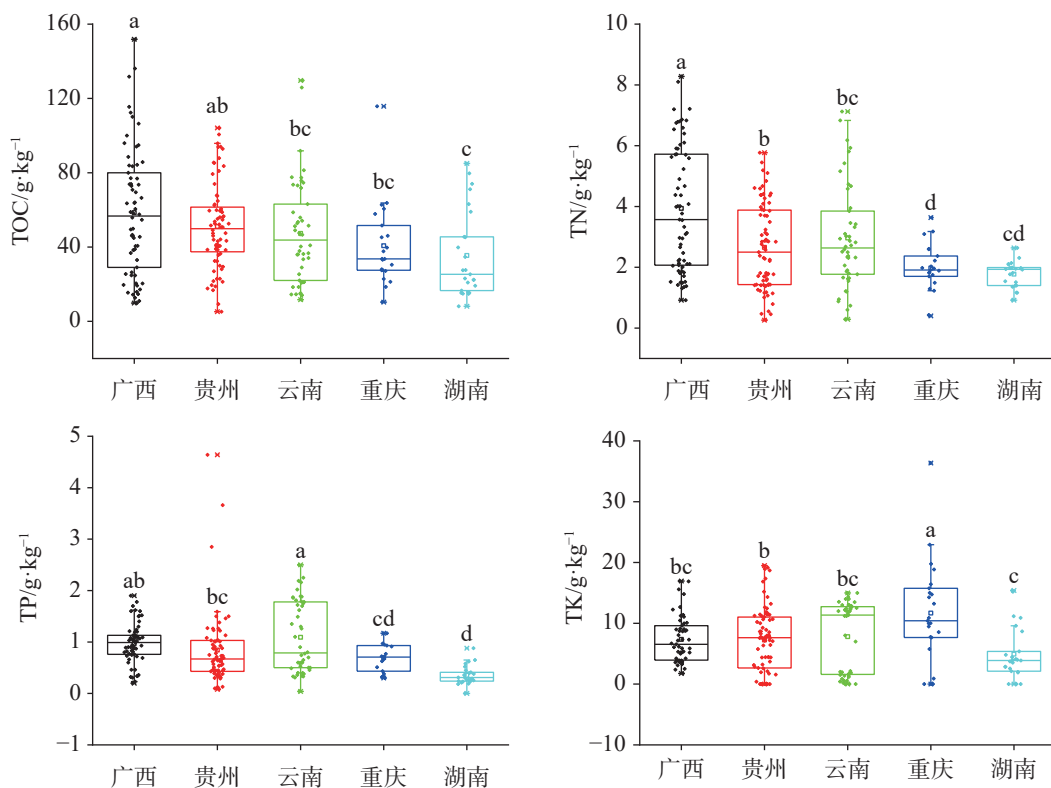


图 2 西南石漠化植被修复下土壤 TOC、TN、TP、TK 土壤差异性 (小写字表示在 P=0.05% 水平下土壤各个指标差异性)
Fig. 2 Differences of soil TOC, TN, TP, TK under the vegetation restoration of rocky desertification areas in Southwest China
(Lower case letters indicates the differences in soil indicators at P = 0.05% level)

总蓄积量达 7.90 亿 m^3 , 人工林面积居全国第一, 石漠化土地面积减少率位居全国第一, 改善了石漠化区恶劣的生态环境^[26]。

贵州省土壤养分指标 TOC、TN、TP、TK 均值分别为 $53.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $9.07 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, TOC、TN 比全国养分等级一级高 34% 和 37%, TP 值在全国养分等级二等范围, TK 位于全国养分等级五等, 贵州省石漠化区实施植被修复后土壤肥力提升明显。贵州省从 1980 年的石山治理阶段到目前

石漠化水土保持小流试点治理, 截至 2016 年底, 贵州省石漠化面积为 $3\,705.15 \text{ 万 hm}^2$, 比 2011 年底的 $4\,535.7 \text{ 万 hm}^2$ 减少了 830.55 万 hm^2 , 其中重度和极重度石漠化面积从 2011 年的 637.05 万 hm^2 下降到 2016 年的 422.7 万 hm^2 , 全省石漠化扩展趋势得到有效遏制, 进一步说明贵州省石漠化治理已获得明显成效^[27]。

云南省 TOC、TN、TP、TK 均值分别为 $43.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $7.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; TOC、TP

指标高于全国土壤养分一等级的 9%、21%，TN 属于全国养分等级二等，TK 属于五等级别。云南省 TP 含量为五省(区、市)最高，主要原因是云南拥有全中国最大的磷矿，磷矿资源丰富致使云南省土壤全磷元素较高，同时随着云南省对石漠化治理进程的加速，其他三个土壤指标也有不同程度提高。

重庆市 TOC、TN、TP、TK 含量均值分别为 $40.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.97 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $13.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，TOC 指标高于全国土壤养分一等级的 1.75%，TN 和 TP 属于全国养分等级二等，TK 属于四级范畴，但在五省(区、市)属于最高值。重庆市全钾含量偏高可能原因是该区域石漠化面积较小，土壤受到负面干扰较小，土壤中的钾元素淋溶作用较其他省(区)小。前人研究土壤中钾元素回收利用较慢，这与钾元素流失风险有关系，使得钾元素含量较高^[28-29]。重庆市土壤养分指标改善没有广西、贵州和云南明显，需要加快石漠化治理进程。

湖南省 TOC、TN、TP、TK 均值分别为 $36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $5.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，TOC 指标为五省(区、市)唯一低于全国养分等级一等的省份，TN、TP、TK 值分别为全国养分等级的二等、五等、五等，土壤养分指标的改善最不明显，可能是由于湖南省石漠化土地和贫困人口较其他省份少，湖南省对石漠化治理的关注度小于其他省份，湖南省应加强石漠化治理力度，加速石漠化生态系统恢复。

2.2 西南石漠化区林下土壤化学计量特征

2.2.1 石漠化区整体化学计量特征

石漠化区林下土壤养分化学计量分析，C、N、P、K 分别是 TOC、TN、TP、TK 的缩写；整体性化学计量 C : N 为 19.46、C : P 为 80.57、C : K 为 9.67、N : P 为 4.37、N : K 为 0.56、P : K 为 0.19(表 3)，

C : N 比值高于全球森林土壤比(12.4)，当土壤处于碳积累时，C : N 会呈增加趋势，很好解释了石漠化区域森林植被具有较强的碳汇功能^[30]。C : P 与全球森林土壤比(81.9)持平。N : P 低于全球森林土壤比(6.6)，TN、TP 的累计与释放对此比值的贡献率还需进一步研究。C : K、N : K、P : K 比值均高于古班通沙漠(0.099、0.013、0.034)，说明整个中国土壤养分各个元素含量分布不均匀，变异性较大。整个西南石漠化地区土壤 TK 含量($9.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)都属于低钾范围区，且 C : K、N : K、P : K 化学计量比值的大小受 C、N、P 影响大。

由各元素指标相关分析可知(图 3)，西南石漠化林下土壤 TOC 和 TN 指标呈正相关趋势，说明氮元素的累积促进碳元素的累积，此结论和 Spinnler 研究结论一致，在陆地生态系统中 90% 以上的地上部分净生产量通过凋落物方式返回地表，Spinnler 等^[31-32]在模拟森林土壤碳库对不同氮沉降水平的响应实验中，发现氮沉降延缓了土壤腐殖质的分解速度，进而提高了碳储量，土壤 C、N 在积累和消耗之间存在固定比值，且两者相关性显著，在外界环境影响下响应保持同步。五省(区、市)石漠化区 C : K 和 P : K 呈显著负相关，由于 TOC 和 TP 呈正相关，但是相关系数较小，说明较低的 TK 对 C : K、P : K 的相关性影响较大。五省(区、市)石漠化区土壤中 TK 都较低，植物的生长亦受低 TK 含量限制，土壤需要补充 TK 元素，此结论与 Shen 等^[33]研究得到云南地区植物生长受到钾元素限制的结论保持一致。

2.2.2 西南五省(区、市)化学计量特征差异性

贵州省石漠化林地土壤 C : N 为 23.20、C : P 为 83.49、C : K 为 10.17、N : P 为 4.36、N : K 为 0.42、P : K 为 0.17。C : N、C : P、C : K 均大于全国

表 3 西南石漠化区土壤化学计量特征比

Table 3 Ratio of soil stoichiometry in rocky desertification areas of Southwest China

名称	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
贵州	23.20	83.49	10.17	4.36	0.42	0.17
广西	16.20	65.83	11.81	4.64	0.71	0.19
云南	19.47	85.98	13.91	3.97	0.93	0.37
重庆	21.27	61.26	4.82	3.16	0.27	0.12
湖南	17.18	106.29	7.62	5.72	0.47	0.10
全国	19.46	80.57	9.67	4.37	0.56	0.19

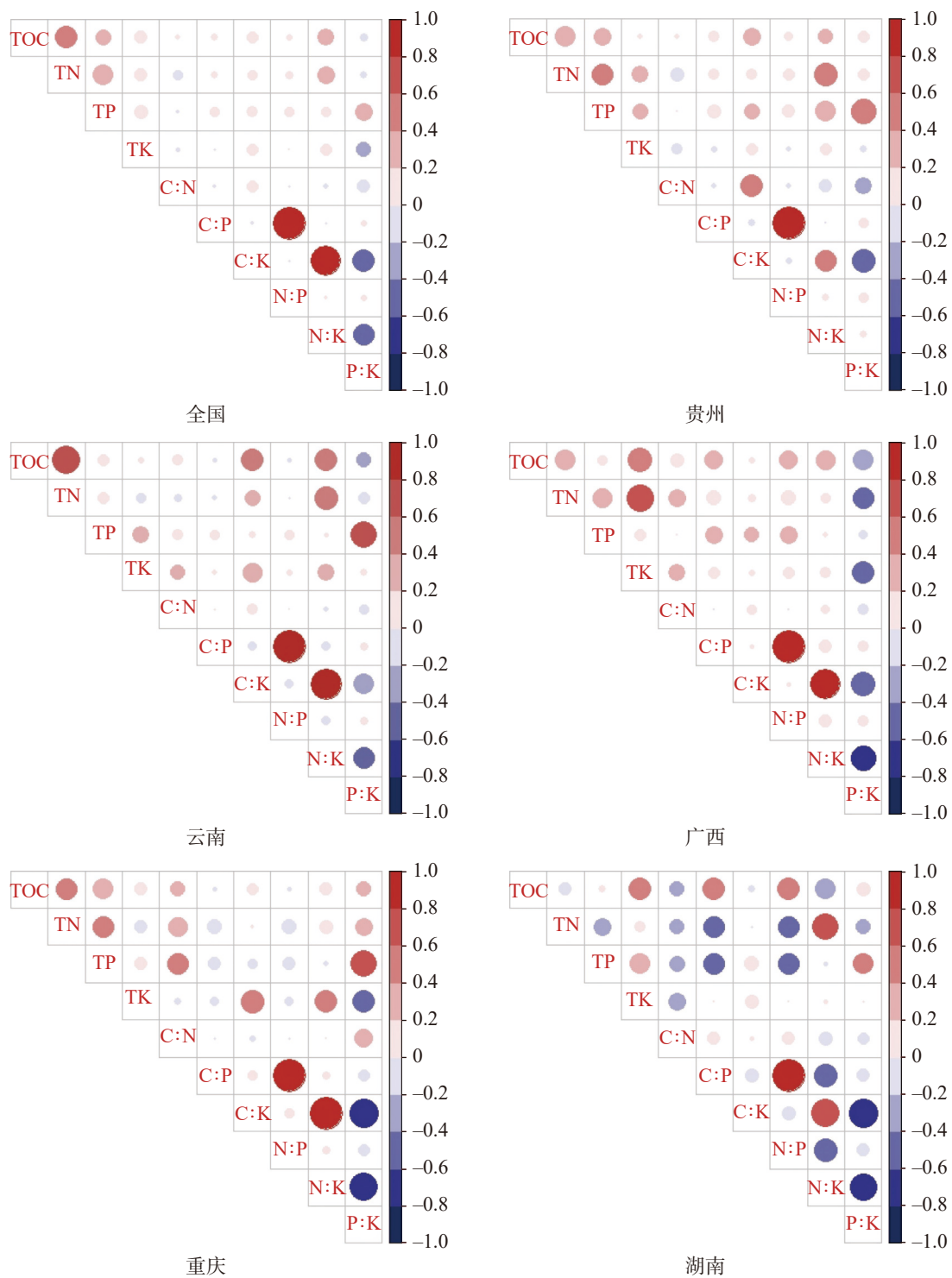


图 3 西南石漠化土壤养分化学计量特征相关性

Fig. 3 Correlation between stoichiometric characteristics of soil nutrients in rocky desertification areas of Southwest China

均值, 由于贵州省土壤中 TN、TP、TK 含量和全国水平差异不大, 说明贵州省石漠化植被修复土壤固 C 能力高于全国均值; 另外, TN 和 TP 呈显著正相关关系, 但 N : K 和 P : K 呈正相关不显著, 再次说明较低含量的 TK 对化学计量比的影响较大。贵州省

N : P 与全国水平持平, 得到贵州省石漠化区土壤中 N 和 P 含量之比和全国保持齐平, 说明土壤中 N 素和 P 素分解与存储速率之比与全国水平之间维持在一个稳定值^[34]。

广西 TOC 和 C : K 呈较为显著正相关关系,

TOC 和 TN 与 N : K 呈正相关关系, TP 对 P : K 呈正相关, 再次说明 TOC 和 TN 之间存在正相关关系。但广西的 TN 和 TP 呈正相关关系不显著, 广西 C : N(16.20) 和 C : P(65.83) 低于全国平均水平, 其他化学计量比值均高于全国平均水平, 说明广西石漠化植被修复后不仅土壤 TOC 含量累积快, 且土壤 TN 和 TP 养分存储速率也较高, 证实广西植被修复对土壤指标营养改良效益明显^[35]。

云南 TOC 和 TK、TN 和 TK 呈显著正相关, 说明云南植被修复石漠化土壤养分 TOC、TN、TK 之间存在较密切的联系, 趋同性保持一致。云南 C : P、C : K、N : K、P : K 高于全国平均水平, C : N 与全国平均水平持平, N : P 低于全国平均比值, 因云南省 TP 含量居五省(区、市)第一, 说明云南石漠化林地植被固碳能力高于全国平均水平, 证明云南省石漠化林地植被土壤养分指标状况良好, 主要问题是 K 元素偏低^[36]。

重庆 TN 和 C : N 呈正相关趋势, TN 和 TOC 呈显著正相关, 说明 TOC 增量较 TN 大, 植被修复土壤养分 TOC 存储速率大于 TN 存储速率。重庆市除 C : N(21.27) 高于全国平均水平外, C : P 和 N : P 低于全国比值, 主要与重庆 TP 含量高有关, C : K、N : K 和 P : K 低于全国平均水平, 主要与较高 TK 含量有关。

湖南是五省(区、市)中养分元素化学计量关系最复杂的, TN 和 TOC 相关性和其他四省(区、市)不一样, 关系不显著; 而 C : P 和 N : P 呈显著正相关关系, C : K 和 N : K 为显著正相关关系, 说明在 TP、TK 元素的参与下, 化学计量比值的相关性关系更加显著, 证明湖南石漠化林地植被受 TK、TP 的影响极大; 同时, 湖南 TN、TP 与 N : P 都呈负相关, 则 TP 对土壤养分的影响较 TN 大。在湖南 C : P、N : P 比值大于全国比值, 其他化学计量比值小于全国比值, 石漠化林地土壤在碳和氮循环速率相当的情况下, TP 元素匮乏导致其化学计量比高于全国。另外, TK 含量极低, 因此湖南省林地植被土壤除了需要额外补充 TP 相关肥料外, 还需要补充 TK 相关肥料^[37]。

3 结论与展望

(1) 采取植被修复措施后石漠化地区除植被覆盖增加外, 土壤养分的改善效果也较为明显, 进一步

印证中国西南石漠化地区呈现“石漠化面积减少, 生态环境好转”的态势;

(2) 广西壮族自治区、贵州省、云南省石漠化治理已取得巨大效益, 但湖南省、重庆市仍需加大对石漠化治理的关注及投入力度, 确保本区域石漠化生态环境改善, 进而提高全国石漠化治理成效提高;

(3) 中国石漠化区土壤养分整体性缺 TK, 植物生长亟需加强钾元素补充, 此外, 重庆市植物生长需补充氮肥, 湖南省植被生长需补充磷、钾元素。

石漠化治理的复杂性、动态性、长期性决定了亟需开展更深入研究。2018 年 1 月 9 日,《自然》子刊(Nature Sustainability)发表石漠化生态修复与治理成效评估成果; 1 月 25 日,《自然》以“卫星影像显示中国正在变得更绿”为主题发表长篇评述, 进一步肯定中国西南地区石漠化治理取得的显著成果^[38-39]。目前, 在大气候背景下需从宏观角度分析植被修复和气候因子对土壤养分指标改善的驱动作用占比, 系统揭示石漠化区土壤养分变化机理; 另外, 还需进一步细化不同时间尺度中不同植被区域下土壤养分的特征, 可采用动态跟踪法研究, 为全面和准确预估中国石漠化区植被修复对全球生态系统变化的响应提供数据支撑, 同时也可对石漠化区制订更具有针对性的防控和生态治理措施提供依据。

参考文献

- [1] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 程洋, 杨奇勇, 吴泽燕, 梁建宏. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 461-468.
JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, TONG Liqiang, CHENG Yang, YANG Qiyong, WU Zeyan, LIANG Jianhong. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of Southwest China in the 21st century[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 461-468.
- [2] 熊平生, 袁道先, 谢世友. 我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J]. 中国岩溶, 2010, 29(4): 355-362.
XIONG Pingsheng, YUAN Daoxian, XIE Shiyu. Progress of research on rocky desertification in South China karst mountain[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(4): 355-362.
- [3] 李阳兵, 黄娟, 徐倩, 罗光杰. 对石漠化概念及其治理的再思考[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2017, 35(5): 1-6.
LI Yangbing, HUANG Juan, XU Qian, LUO Guangjie. Rethinking on the concept and control of rocky desertification[J]. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Science*, 2017, 35(5): 1-6.
- [4] 李阳兵. 中国西南岩溶山地石漠化转型演变解析[J]. 中国岩

- 溶, 2021, 40(4): 698-706.
- LI Yangbing. Transformation and evolution of rocky desertification in karst mountainous areas of Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 698-706.
- [5] 王宇, 张华, 张贵, 彭淑惠, 杨文礼, 蔡保新, 冯敏, 王梓激. 云南省石漠化调查及治理综述[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 486-496.
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, PENG Shuhui, YANG Wenli, CAI Baoxin, FENG Min, WANG Ziwei. Investigation and control of rocky desertification in Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 486-496.
- [6] 熊康宁, 池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J]. *生态经济*, 2015, 31(1): 23-30.
- XIONG Kangning, CHI Yongkuan. Problems and countermeasures facing karst ecosystems in Southern China[J]. *Ecological Economics*, 2015, 31(1): 23-30.
- [7] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- SONG Tongqing, PENG Wanxia, DU Hu, WANG Kelin, ZENG Fuping. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [8] 许尔琪. 基于CiteSpace的喀斯特石漠化国际研究进展[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 728-738.
- XU Erqi. Progress of international research on karst rocky desertification based on CiteSpace[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 728-738.
- [9] Piché, Nathan, Kelting D L. Recovery of soil productivity with forest succession on abandoned agricultural land[J]. *Restoration Ecology*, 2015, 23(5): 645-654.
- [10] Powlson D S, Hirsch P R, Brookes P C. The role of soil microorganisms in soil organic matter conservation in the tropics[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61(1-2): 41-51.
- [11] Mahaney W M, Smemo K A, Yavitt J B. Impacts of *Lythrum salicaria* invasion on plant community and soil properties in two wetlands in central New York, USA[J]. *Canadian Journal of Botany*, 2006, 84(3): 477-484.
- [12] Lozano Yudi M, Hortal Sara, Armas Cristina, Pugnaire Francisco. Interactions among soil, plants, and microorganisms drive secondary succession in a dry environment[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 298-306.
- [13] Zhu H H, He X Y, Wang K L, Su Y R, Wu J S. Interactions of vegetation succession, soil bio-chemical properties and microbial communities in a karst ecosystem[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 51: 1-7.
- [14] Berthrong Sean T, Jobbagy Esteban G, Jackson Robert B. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation[J]. *Ecological Applications*, 2009, 19(8): 2228-2241.
- [15] 蒋勇军, 袁道先, 章程, 况明生, 王建力, 谢世友, 张贵, 何绕生. 典型岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响: 以云南小江流域为例[J]. *地理学报*, 2005, 60(5): 49-58.
- JIANG Yongjun, YUAN Daoxian, ZHANG Cheng, KUANG Mingsheng, WANG Jianli, XIE Shiyu, ZHANG Gui, HE Raosheng. Effects of land use change on soil properties in typical karst agricultural region: A case study of Xiaojiang watershed in Yunnan Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 49-58.
- [16] Zhang W, Zhao J, Pan F J, Li D, Chen H, Wang K. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in Southwest China[J]. *Plant Soil*, 2015, 391(1-2): 77-91.
- [17] J Sardans, J Peñuelas. Drought changes phosphorus and potassium accumulation patterns in an evergreen Mediterranean forest[J]. *Functional Ecology*, 2007, 21(2): 191-201.
- [18] A Puttaso, P Vityakon, P Saenjan, V Trelo-ges, G Cadisch. Relationship between residue quality, decomposition patterns, and soil organic matter accumulation in a tropical sandy soil after 13 years[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(2): 159-174.
- [19] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. *草业科学*, 2008, 25(9): 19-25.
- YUAN Daoxian. Global vision of karst rocky desertification and countermeasures and experience of China[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(9): 19-25.
- [20] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效, 问题与对策[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 37-42.
- CHEN Hongsong, YUE Yuemin, WANG Kelin. Comprehensive control of rocky desertification in karst area of Southwest China: Effectiveness, problems and countermeasures[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 37-42.
- [21] Frida I Piper, Lohengrin A Cavieres, Marjorie Reyes-Díaz, Luis J Corcuera. Carbon sink limitation and frost tolerance control performance of the tree *Kageneckia angustifolia* D. Don (Rosaceae) at the treeline in central Chile[J]. *Plant Ecology*, 2006, 185(1): 29-39.
- [22] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(9): 1443-1451.
- [23] Vincent A G, Turner B L, Tanner E V J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(1): 48-57.
- [24] DF Meason, TW Idol, JB Friday, PG Scowcroft. Effects of fertilisation on phosphorus pools in the volcanic soil of a managed tropical forest[J]. *Forest Ecology & Management*, 2009, 258(10): 2199-2206.
- [25] K Johnson, M Huyler, H Westberg, B Lamb, P Zimmerman. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF6 tracer technique[J]. *Environmental & Technology*, 1994, 28(2): 359.

- [26] 广西壮族自治区生态环境厅编写组. 2018年广西壮族自治区生态环境状况公报[N]. 广西壮族自治区生态环境厅, 2018. Compilation Group of Department of Ecology and Environment of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Ecological and Environmental Status Bulletin of Guangxi Zhuang Autonomous Region[N]. Department of Ecology and Environment of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 2018.
- [27] 贵州编写组. 贵州石漠化面积减少830万亩[N]. 新华网, 2019. Guizhou Editorial Group. Rocky desertification area in Guizhou reduced by 553,610 million square metres[N]. Xinhuanet, 2019.
- [28] 袁道先. 地质作用与碳循环研究的回顾和展望[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2157. YUAN Daoxian. Review and prospect of geological processes and carbon cycle[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26): 2157.
- [29] 规划编写组, 张菁. 广西壮族自治区岩溶地区石漠化综合治理规划[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 93-102. Planning and Writing Group, ZHANG Jing. Comprehensive control plan of rocky desertification in karst area of Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(9): 93-102.
- [30] W D Bowman, H Steltzer, T N Rosenstiel, C C Cleveland, C L Meier. Litter effects of two co-occurring alpine species on plant growth, microbial activity and immobilization of nitrogen[J]. *Oikos*, 2010, 104(2): 336-344.
- [31] Hagedorn F, Spinnler D, Siegwolf R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(12): 1683-1692.
- [32] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682. ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, AN Shaoshan. Soil ecological stoichiometry in different vegetation areas of loess hilly-gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [33] Y Shen, Y Yang, M E Lucas-Borja, F Chen, Y Tang. Change of soil K, N and P following forest restoration in rock outcrop rich karst area[J]. *Catena*, 2020, 186: 104395.
- [34] Gren G I. The C: N: P stoichiometry of autotrophs theory and observations[J]. *Ecology Letters*, 2010, 7(3): 185-191.
- [35] 杨慧, 李青芳, 涂春艳, 曹建华. 桂林毛村岩溶区典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 广西植物, 2015, 35(4): 493-499, 555. YANG Hui, LI Qingfang, TU Chunyan, CAO Jianhua. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of typical plants in Maocun karst area, Guilin[J]. *Guihaia*, 2015, 35(4): 493-499, 555.
- [36] 曹娟, 闫文德, 项文化, 谌小勇, 雷丕锋. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 1-8. CAO Juan, YAN Wende, XIANG Wenhua, CHEN Xiaoyong, LEI Pifeng. Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in three chinese fir plantations in Huitong, Hunan Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(7): 1-8.
- [37] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 68-76. QIN Juan, KONG Haiyan, LIU Hua. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different forest types of masson pine[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(2): 68-76.
- [38] Xiaowei Tong, Martin Brandt, Yuemin Yue, Stephanie Horion, Kelin Wang, Wanda De Keersmaecker, Feng Tian, Guy Schurgers, Xiangming Xiao, Yiqi Luo, Chi Chen, Ranga Myneni, Zheng Shi, Hongsong Chen, Rasmus Fensholt. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [39] Macias-Fauria M. Satellite images show China going green[J]. *Nature*, 2018, 53: 411-413.

Nutrient characteristics and differences of forest soil in rocky desertification areas of Southwest China

CHEN Qiufan¹, LU Qi^{1,3}, WANG Yan^{1,2}, LIU Yungen^{1,2}

(1. Institute of Rocky Desertification Control, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Key Laboratory of Ecological Evolution and Pollution Control in Mountainous Rural Areas of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650224, China;

3. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100009, China)

Abstract In this study, papers related to vegetation restoration and soil in rocky desertification area since 1990s have been retrieved. Based on nutrient grading standards of two national soil censuses, the soil nutrient improvement and soil stoichiometry characteristics have been explored, which can provide theoretical foundation for the ecological restoration effect and model screening of rocky desertification. Results are shown as follows, (1) The mean values of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) in the forest soil of rocky desertification areas of Southwest China are higher than those of Grade I of two national soil censuses. Total phosphorus (TP) falls into Grade II, with

obvious soil nutrient improvement, while the total potassium (TK) concentration falls into the Grade V of the low potassium area. (2) According to the soil censuses, TOC and TN rank top among the five provinces/regions/cities, and TP and TK fall into Grade II and Grade IV, respectively in Guangxi Zhuang Autonomous Region, which can show the most significant increase in soil nutrient concentration. In Guizhou Province, TOC and TN are higher than those of grade I by 34% and 37%, respectively, and TP falls into Grade II and TK Grade V, reflecting obvious nutrient improvement of forest soil in rocky desertification areas of this province. In Yunnan Province, TOC and TP are higher than those of Grade I by 9% and 21% respectively. TN falls into Grade II and TK Grade V. These indexes show that soil nutrients has been improved to different degrees. TOC in Chongqing City is higher than that of Grade I by 1.75%. Both TN and TP fall into Grade II. TK, ranking top among the five provinces/regions/cities, falls into Grade IV, showing less improvement compared with that of the other three provinces. In Hunan Province, TOC, TN, TP and TK fall into Grades II, II, V, and V respectively, suggesting that Hunan Province should focus on controlling rocky desertification. (3) Indicators of TOC and TN in the soil of rocky desertification areas in Southwest China are positively correlated, and the growth of vegetation is limited by potassium. TOC, TN and TP are stored quickly in Guangxi with significant soil improvement. The soil carbon sequestration capacity of Guizhou Province is higher than that of national average. In rocky desertification areas of Yunnan Province, low TK has posed a bad effect on vegetation growth. The high concentration of TK in Chongqing is not related to TOC, TN, and TP, but nitrogen limits the growth of plants. Phosphorus and potassium elements should be supplemented in growing vegetation in Hunan Province. In conclusion, potassium should be supplemented in growing plants in rocky desertification areas of Southwest China. In addition, phosphorus and nitrogen should be supplemented in Hunan Province and Chongqing City. To strengthen the ecological management of rocky desertification and bring the management into full play, Yunnan, Hunan and Chongqing should learn the experience of ecological restoration from Guangxi.

Key words rocky desertification, five provinces/regions/cities in Southwest China, vegetation restoration, soil nutrients, stoichiometric ratio

(编辑 黄晨晖)