



典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态及其对极端内涝灾害的响应

伍方骥, 刘娜, 胡培雷, 王克林, 张伟, 邹冬生

引用本文:

伍方骥, 刘娜, 胡培雷, 等. 典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态及其对极端内涝灾害的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 429–437.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190711>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滨海盐渍区不同土地利用方式土壤-植被系统碳储量研究

Carbon storage of soil-vegetation system under different land use patterns in saline coastal regions

中国生态农业学报. 2017, 25(11): 1580–1590 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170263>

中国北方土石山区植被恢复及其生态效应研究进展

Research advances in vegetation restoration and its ecological effects in earth-rock mountain areas of North China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1319–1331 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190108>

喀斯特石漠化生态系统服务价值对生态治理的响应*—以贵州花江峡谷石漠化治理示范区为例

Ecosystem service value responses to ecological control in Karst region—A case study of Huajiang Gorge Demonstration Area of Rocky Desertification Control in Guizhou

中国生态农业学报. 2015(6): 775–784 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141035>

未来30年川东平行岭谷区县域农田SOC动态模拟

Dynamic simulation of farmland SOC in parallel ridge valley area in eastern Sichuan in the next 30 years

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1848–1857 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170423>

等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响

Effect of partial replacement of inorganic N with organic manure on crop yield and soil nutrient balance in arable ecosystem in karst peak-cluster depression

中国生态农业学报. 2017, 25(6): 812–820 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161016>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190711

伍方骥, 刘娜, 胡培雷, 王克林, 张伟, 邹冬生. 典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态及其对极端内涝灾害的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 429–437

WU F J, LIU N, HU P L, WANG K L, ZHANG W, ZOU D S. Soil carbon and nitrogen dynamics during vegetation restoration and their responses to extreme water-logging disasters in a typical karst depression[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 429–437

典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态 及其对极端内涝灾害的响应*

伍方骥^{1,2,3}, 刘娜⁴, 胡培雷^{1,2}, 王克林^{1,2}, 张伟^{1,2}, 邹冬生^{3**}

(1. 湖南农业大学 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室 长沙 410125;
3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站 环江 547100; 4. 河北地质大学商学院 石家庄 050031)

摘要: 西南喀斯特地区是我国主要的生态脆弱区之一, 石漠化严重, 旱涝灾害频发。植被恢复是提升脆弱生态系统土壤碳氮固持的有效方式, 但该区不同植被恢复方式土壤碳氮动态监测的研究还很缺乏。本研究以典型喀斯特峰丛洼地为对象, 选取人工林、牧草地、人工林+牧草地、撂荒地自然恢复4种最主要的植被恢复方式为研究对象, 以耕地作为对照, 对比分析退耕前(2004年)、退耕10年(2014年)和13年后(2017年)土壤碳氮储量动态变化特征。其中2004—2014年研究区未发生极端内涝灾害, 2014—2017年连续发生2次极端内涝灾害事件。研究表明, 退耕10年后, 4种恢复方式下土壤有机碳(SOC)储量均显著增加, 但退耕13年后, 除撂荒地SOC持续增加外, 其他3种恢复方式下SOC表现出下降趋势。植被恢复后土壤全氮(TN)储量提升相对缓慢, 退耕10年仅牧草地显著增加, 退耕13年后人工林+牧草和撂荒地TN增加, 且撂荒地在退耕后呈持续增加趋势。相关性分析结果表明, 土壤交换性 Ca^{2+} 与SOC、TN均呈显著正相关关系, 且与2014年相比, 2017年不同植物恢复方式下土壤交换性 Ca^{2+} 均显著下降, 这可能与研究区2015年和2016年连续内涝灾害有关。以上结果说明, 不同恢复方式均能显著提升喀斯特地区土壤碳氮固持, 并以自然恢复最佳, 其生态系统能有效抵御极端气候灾害带来的负面影响。

关键词: 喀斯特生态系统; 植被恢复方式; 植被恢复年限; 土壤有机碳; 土壤全氮; 内涝灾害

中图分类号: S15

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Soil carbon and nitrogen dynamics during vegetation restoration and their responses to extreme water-logging disasters in a typical karst depression*

WU Fangji^{1,2,3}, LIU Na⁴, HU Peilei^{1,2}, WANG Kelin^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, ZOU Dongsheng^{3**}

(1. Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Progresses in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China; 4. Business School of Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

* 河北省科技计划项目(5457631D)、国家重点研发计划项目(2016YFC0502400)和国家自然科学基金项目(31670529)资助

** 通信作者: 邹冬生, 主要研究方向为农业生态学研究。E-mail: zds@hunan.edu.cn

伍方骥, 主要从事区域生态学和恢复生态学研究。E-mail: 547920964@qq.com

收稿日期: 2019-10-06 接受日期: 2019-11-12

* The study was supported by the Science and Technology Project of Hebei Province (5457631D), the National Key Research and Development Project of China (2016YFC0502400) and the National Natural Science Foundation of China (31670529).

** Corresponding author, E-mail: zds@hunan.edu.cn

Received Oct. 6, 2019; accepted Nov. 12, 2019

Abstract: The karst region in Southwest China is one of the most ecologically fragile areas characterized with severe rocky desertification, and increased and frequent flood events. Vegetation restoration has been recognized as an effective strategy for soil carbon and nitrogen accumulation in degraded ecosystems. However, soil carbon and nitrogen dynamics following vegetation restoration have not been evaluated with a long-term, fixed-point research approach in the karst areas. Thus, we compared the effects of vegetation restoration types on soil carbon and nitrogen stocks before (in 2004) and after 10 (in 2014) and 13 years (in 2017) of cropland abandonment. Four restoration strategies were implemented in the present study, namely, restoration with plantation forest, grassland, a combination of plantation forest and grassland, and spontaneous regeneration to a natural grassland. Cropland under maize-soybean rotation (CR) was used as the control. From 2004 to 2014, there were no extreme water-logging disasters, whereas from 2014 to 2017, two extreme water-logging disasters occurred in the study region. The results revealed that soil organic carbon (SOC) stocks in all the four restored vegetation types significantly increased after 10 years of cropland abandonment, whereas after 13 years, the plantation forest, grassland, and the combination of plantation forest and grassland, except the natural grassland, showed a decreasing trend. The increase in the total nitrogen (TN) content of soil in response to vegetation restoration was less than that of SOC; the TN content significantly increased only in the grassland after 10 years of cropland abandonment. The TN content in the combination of plantation forest and grassland and natural grassland increased after 13 years of cropland abandonment, and that in the natural grassland continuously increased after cropland abandonment. The correlation analysis showed that soil exchangeable Ca^{2+} was positively correlated with SOC and TN ($P < 0.05$). However, the content of soil exchangeable Ca^{2+} significantly decreased in 2017 than in 2014. The reduction in soil exchangeable Ca^{2+} can be attributed to the continuous flood event in the study area in 2015 and 2016. Vegetation restoration can significantly improve soil carbon and nitrogen sequestration in karst areas. Furthermore, when compared with other vegetation restoration types, natural vegetation restoration was more beneficial to soil carbon and nitrogen sequestration, which can resist the negative effects of extreme climate disasters effectively.

Keywords: Karst ecosystem; Vegetation restoration measure; Vegetation restoration years; Soil organic carbon; Soil total nitrogen; Water-logging disaster

土壤是陆地生态系统非常重要的碳(C)库, 土壤有机碳(SOC)储量大约是大气中C库的 2~3 倍^[1]。研究表明, 土地利用变化会通过影响SOC动态从而影响 CO_2 排放, 进而加速或缓解全球气候变暖^[2-3]。土壤氮(N)通常是陆地生态系统重要的限制性因子, 影响植物生长和物种组成, N缺乏可能会导致植被无法正常生长, 或植被无法顺利演替^[4-6]。土壤C、N固持受到C、N输入与输出动态平衡的影响^[7], 主要受凋落物数量与质量、微生物、环境因子等影响^[8-9], 另一方面, SOC的长期固持还受到土壤N和C N的限制^[10]。土壤结构(如土壤团聚性、土壤质地、土壤矿物质等)对C、N的稳定能力也会影响C、N输出。Li等^[11]认为, 土壤C、N累积受输出影响更大, 若土壤对有机质(SOM)的稳定能力较弱, 通过凋落物输入的有机质同样无法固持在土壤中。通常, 钙质含量高的土壤, 其土壤 Ca^{2+} 可与SOM矿质结合形成稳定的SOM, 有利于土壤C、N固持^[12]。植被恢复是提升土壤C、N固持的有效措施^[13-14]。但受地质背景、气候、地形、植被类型、恢复年限等影响, 导致不同研究结果下植被恢复对SOC固持潜力的影响并不一致^[15]。因此, 有必要针对特定生态脆弱区深入分析不同植被恢复方式对土壤碳氮固持的影响。此外, 在全球变化背景下, 极端气候事件增加, 尤其内涝灾害频发^[16]。不同植被恢复方式下土壤C、N如何响

应极端内涝灾害目前也缺乏充分认识。

我国西南喀斯特地区是全球碳酸盐岩集中分布区面积最大、人地矛盾最尖锐的地区, 以石漠化为特征的土地退化严重, 属于典型的生态环境脆弱区。围绕喀斯特地区石漠化治理与生态恢复, 国家先后在喀斯特地区实施了天然林保护、退耕还林还草、石漠化综合治理等一系列生态保护与建设工程^[17-18]。经过十多年的生态治理, 植被覆盖率明显提升, 然而土壤支撑功能恢复滞后, 尤其土壤 C、N 固持提升缓慢, 喀斯特地区生态系统恢复的可持续性仍然面临挑战^[19-20]。

然而, 关于喀斯特不同恢复模式下土壤 C、N 动态变化的研究还非常有限。目前关于喀斯特植被恢复对土壤 C、N 固持的研究大都采用“空间代时间”的方法, 缺乏动态追踪^[21-24]。喀斯特地区由于土层浅薄, 地上地下二元结构发育, 空间异质性较强, 采用“时空替代法”通常很难保证样点之间的可比性。因此, 定点监测植被恢复前后土壤 C、N 动态变化特征有助于正确评估喀斯特不同植被恢复模式下生态成效。另一方面, 最近的研究表明, 我国西南地区极端气候事件呈现逐渐增强趋势^[25]。而植被恢复初期群落抵抗力和恢复力较差, 当生态系统经历严重的气候变化或人为干扰胁迫时土壤 C、N 提升可能停滞甚至退化^[26]。因此, 持续监测不同植被恢复模式下土壤 C、N 动态变化特征及其对极端气候事

件的响应, 有助于正确评估不同植被恢复模式下土壤 C、N 固定效应这一关键功能, 尤其处于生态恢复工程深入推进期的脆弱喀斯特生态系统。

本文以桂西北喀斯特峰丛洼地为研究对象, 以退耕还林还草前(2004 年)样地 C、N 储量为基准, 选取人工林、牧草、人工林+牧草、撂荒 4 种喀斯特地区最主要的植被恢复方式, 分析退耕还林还草 10 年(2014 年)和 13 年(2017 年)后土壤 C、N 动态变化特征, 探讨不同植被恢复方式对喀斯特土壤 C、N 的影响, 并针对退耕期间样地发生的严重内涝灾害对不同恢复方式下土壤 C、N 的影响进行分析, 以期为喀斯特生态系统恢复和退化生态系统可持续恢复提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县下南乡古周村的中国科学院环江喀斯特农业生态试验站生态重建试验示范区(107°56′~107°57′E, 24°54′~24°55′N)。研究区属于典型的喀斯特峰丛洼地地貌, 地形起伏较大, 最低点海拔为 376 m, 最高海拔为 816 m, 相差 440 m。该地为亚热带季风气候区, 多年平均气温 16.5~20.5。雨量充足, 多年平均降雨量为 1 390 mm, 雨季平均持续 130~140 d, 集中在 4—9 月, 其中 6、7 月份降雨最多, 经常发生小规模内涝灾害, 绝大部分时候持续

时间短, 淹水面积小^[25]。但分别在 2015 年 6 月和 2016 年 6 月期间, 广西北部、中部地区出现连续强降雨, 研究区洼地连续两年发生极端内涝灾害, 降雨量超过 230 mm, 淹水面积高达 87%, 洼地最深水位达 3 m 以上, 持续时间长, 连续淹水持续时间长达半个月以上, 尤其以 2016 年 6 月的洪涝灾害为近 60 年来最大的洪涝灾害。研究区 10 月至次年 3 月为旱季, 降雨量少, 常出现季节性干旱。研究区土壤主要为由碳酸盐岩发育的钙质石灰土, 土壤质地黏重, 分布极不均匀, 基岩大面积裸露, 尤其是坡地, 平均裸岩率达 80%以上。耕地主要集中于洼地和坡脚, 土层浅薄, 生态环境脆弱。洼地平均土层深度约为 75 cm, 部分土深仅 10 cm 左右, 坡地平均土层深度 20~40 cm。研究区生态恢复工程实施前, 石漠化严重, 2004 年开始, 研究区大部分耕地开始退耕, 主要通过人工恢复(种植人工林、牧草、人工林和牧草混合种植)和自然恢复(自然撂荒)两种方式进行植被恢复(表 1)。

1.2 采样方法

本研究以桂西北喀斯特地区常见的 4 种植被恢复方式(包括人工林、牧草地、人工林+牧草、撂荒地)为研究对象, 选择耕地为对照样地, 每种恢复方式 4 个重复, 共 20 个样地, 每个样地 20 m×20 m, 样地处于洼地地势平坦区域, 各样地海拔保持基本一

表 1 研究区不同植被恢复模式及样地特征

Table 1 Vegetation types and characteristics of plots of different vegetation restoration patterns surveyed in the study

	对照(耕地) Control (cropland)	人工恢复 Artificial restoration			自然恢复(撂荒地) Natural restoration (natural grassland)
		人工林 Plantation forest	牧草地 Grassland	人工林+牧草 Combination of plantation forest and grassland	
优势种 Dominant species	玉米 <i>Zea mays</i>	任豆树 <i>Zenia insignis</i>	桂牧 1 号 <i>Pennisetum purpureum</i> cv, Guimu-1	任豆树、桂牧 1 号 <i>Zenia insignis</i> , <i>Pennisetum</i> <i>purpureum</i> cv, Guimu-1	类芦、五节芒、白茅 <i>Neyraudia reynaudiana</i> , <i>Silver grass</i> , <i>Imperata</i> <i>cylindrica</i>
人为措施 Artificial measures	每年翻耕 1~2 次, 施用无机肥料、农家肥和草木灰 Plowing 1~2 times per year; applied inorganic fertilizers, farm manure, and plant ash	种植当年翻耕和施肥 Ploughed and fertilized in the planting year	种植当年翻耕, 每年施用无机肥和农家肥, 牧草每年刈割 3~4 次 Ploughed in the planting year; applied inorganic fertilizers and farm manure, and mowed 3~4 times every year	种植当年翻耕, 每年施用无机肥和农家肥, 牧草每年刈割 3~4 次 Ploughed in the planting year; applied inorganic fertilizers and farm manure; and mowed 3~4 times every year	无耕作和施肥活动 No tillage and fertilization activities
干扰历史 Historical disturbances	连续 100 年以上耕种历史 Continuous farming for more than 100 years	100 年以上耕作历史, 2004 年退耕种植经济林 Continuous farming for more than 100 years, converting into economic forest in 2004	100 年以上耕作历史, 2004 年退耕种植牧草 Continuous farming for more than 100 years, converting into forage grassland in 2004	100 年以上耕作历史, 2004 年退耕混合种植人工林和牧草 Continuous farming for more than 100 years, converting to mixed plantation and grassland in 2004	100 年以上耕作历史, 2004 年撂荒自然恢复为草地 Continuous farming for more than 100 years, abandoning in 2004

致。共采集样品 3 次, 其中, 于 2004 年退耕前采集样品作为本底, 随后于 2014 年(退耕 10 年)和 2017 年(退耕 13 年)分别采集土壤样品。在每个样地内按“S”型选取 15 个点取表层土样(0~15 cm), 充分混匀。土样风干后过筛, 用于测定土壤 C、N、交换性 Ca^{2+} 等指标。同时, 于 2017 年在每个样地内随机设置 4 个小样方(1 m×1 m)并收集样方内所有凋落物并充分混合。

1.3 样品测定

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量法测定^[27], 土壤全氮(TN)采用半微量开氏法测定^[28], 土壤交换性钙(Ca^{2+})采用原子吸收分光光度法测定^[29]。凋落物样品先在烘箱中以 105 °C 烘干 30 min, 然后以 65 °C 烘干至恒重。用球磨机将烘干的凋落物样品磨成均匀的粉末, 然后用元素分析(VARIO MAX, Elementar, Germany)仪测定凋落物 C、N 含量^[30]。土壤容重采用环刀(100 cm³)收集原状土样, 在 105 °C 烘箱中烘干至恒重并称重^[31]。

1.4 数据分析

采用 Office 2013 Excel 进行数据的计算与初步分析, 采用 Kolmogorov-Smirnov 进行样本数据正态性检验。用 SPSS 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、单样本 *t* 检验和回归等统计分析, 用 OriginPro 8.5 (OriginLab, Hampton, MA, USA) 进行图表绘制。本研究中显著水平为 $P < 0.05$, 极显著水平为 $P < 0.01$ 。表中数据为平均值±标准误, 图中误差线为 95%置信区间。SOC 和 TN 储量采用下列公式计算:

$$\text{SOCD} = \text{SOC} \times \text{BD} \times (1 - \delta) \times h / 100 \quad (1)$$

$$\text{TND} = \text{TN} \times \text{BD} \times (1 - \delta) \times h / 100 \quad (2)$$

式中: SOCD 为土壤有机碳储量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), SOC 为土壤有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), BD 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), δ 为土壤中砾石所占比例(%), *h* 为土层厚度(cm); TND 为土壤全氮储量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), TN 为土壤全氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 100 为转换系数。SOC 和 TN 差值采用以下公式计算:

$$\Delta C = C_{\text{vr}} - C_{\text{bvr}} \quad (3)$$

式中: ΔC 为土壤有机碳(全氮)储量变化值($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), C_{vr} 为植被恢复后土壤有机碳(全氮)储量值($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), C_{bvr} 为植被恢复前土壤有机碳(全氮)储量值($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复方式下 SOC 和 TN 储量动态变化特征

与退耕前相比, 2014 年(退耕 10 年)人工林、牧草地、人工林+牧草 SOC 储量显著增加, 且分别增加 26.1%、19.2%、25.8%(图 1)。TN 提升相对缓慢, 退耕 10 年后, 仅牧草地 TN 储量显著增加 14.2%(图 1)。

与 2014 年相比, 2017 年耕地 SOC 和 TN 储量分别下降 14.08%和 14.81%(图 1)。与 2014 年(退耕 10 年)相比, 不同恢复方式间 2017 年(退耕 13 年)SOC 和 TN 储量差异均不显著, 但呈现出不一致的变化规律。其中, 人工林、牧草地、人工林+牧草地 SOC 储量均呈下降趋势, 分别下降 7.24%、4.17%、8.87%, 而撂荒地 SOC 却有所增加, 提升 2.41%。同样地, 人工林和牧草地 TN 储量也表现出下降的趋势, 分别下降 16.45%、10.20%; 而人工林+牧草和撂荒地的 TN 储量有所增加, 分别增加了 8.30%和 11.62%(图 1)。

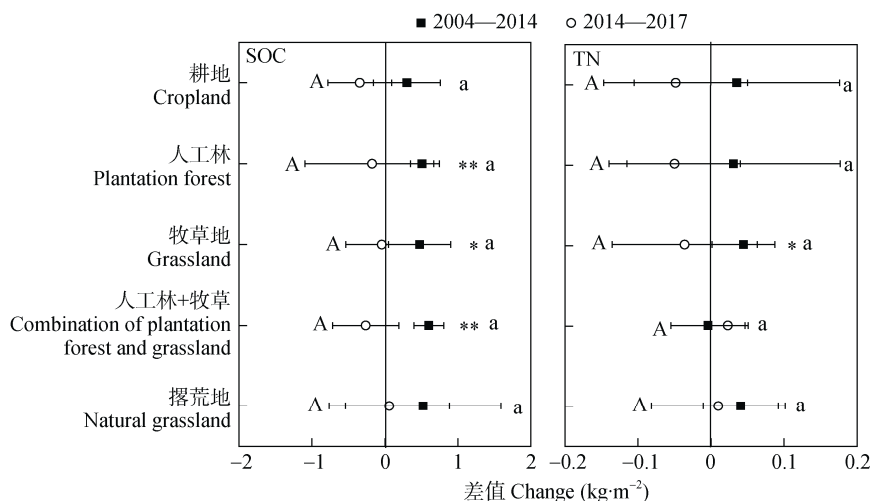


图 1 不同植被恢复方式不同恢复年限下土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)储量变化特征

Fig. 1 Changes in soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) stocks under different vegetation restoration types for different restoration years

*和**分别表示两个时间段的变化值在 $P < 0.05$ 水平和 $P < 0.01$ 水平差异显著; 不同小写和大写字母表示不同植物恢复方式变化值 2004—2014 年和 2014—2017 年差异显著($P < 0.05$)。* and ** indicate significant differences between two periods at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different vegetation restoration types from 2004 to 2014 at $P < 0.05$; different capital letters indicate significant differences among different vegetation restoration types from 2014 to 2017, respectively, at $P < 0.05$.

2.2 不同植被恢复方式下土壤 C/N 变化特征

与退耕前相比, 退耕 10 年后, 除人工林+牧草地土壤 C/N 显著增加外, 其余不同植被恢复方式土壤 C/N 均未显著增加。退耕 13 年后, 不同植被恢复模式下土壤的 C/N 虽然呈增加趋势, 但差异也均未达显著水平(图 2)。

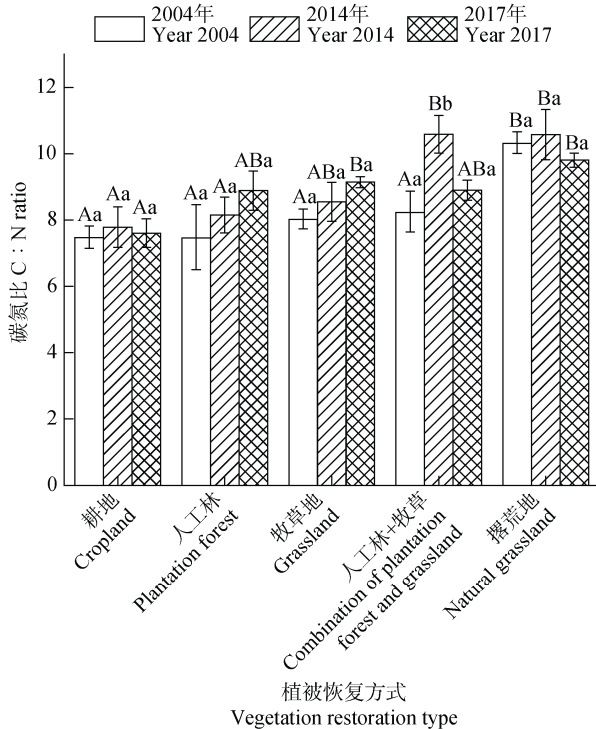


图 2 不同植被恢复方式不同恢复年限下土壤碳氮比变化特征

Fig. 2 Soil ratio of carbon to nitrogen under different vegetation restoration types for different restoration years

不同大写字母表示相同恢复年限不同植物恢复方式间 $P < 0.05$ 水平差异显著, 不同小写字母表示同一植被恢复方式不同恢复年限间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different vegetation restoration types in the same restoration year. Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different restoration years of the same vegetation restoration type.

2.3 土壤 C、N 动态变化的影响因素分析

相关分析结果表明, 凋落物生物量、凋落物 C 含量、凋落物 N 含量与土壤 SOC 和 TN 储量均无显著相关关系(表 2)。

表 2 植被恢复过程中凋落物特征与土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)储量的相关性分析

Table 2 Correlation analyses between litter properties and soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) stocks during vegetation restoration

	凋落物量 Litter fall	凋落物 C Litter C	凋落物 N Litter N
SOC 储量 SOC stock	-0.191	0.203	-0.202
TN 储量 TN stock	-0.153	0.389	-0.236

进一步分析发现, 无论是 2014 年还是 2017 年, 土壤交换性 Ca^{2+} 与 SOC 显著正相关; 交换性 Ca^{2+} 与 TN 在 2017 年也显著正相关(表 3)。同时, 分析发现, 与 2014 年相比, 2017 年不同植物恢复方式下交换性 Ca^{2+} 含量均减少, 耕地、人工林、牧草地、人工林+牧草、撂荒地分别减少 25.00%、29.69%、27.78%、30.10%、33.68%(表 4), 其中, 人工林和撂荒地显著减少。交换性 Ca^{2+} 下降可能是导致 SOC 和 TN 下降的重要原因。

表 3 不同植被恢复年限土壤交换性钙(Ca^{2+})与土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)储量相关性分析

Table 3 Correlation analyses among exchangeable calcium (Ca^{2+}) and soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) stocks in different vegetation restoration years

年份 Year		SOC	TN	Ca^{2+}
2014	SOC	1.000	0.498*	0.453*
	TN		1.000	0.070
	Ca^{2+}			1.000
2017	SOC	1.000	0.814**	0.578**
	TN		1.000	0.659**
	Ca^{2+}			1.000

*和**分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。* and ** indicate significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

表 4 不同植物恢复 10 年(2014 年)和 13 年(2017 年)土壤交换性钙(Ca^{2+})含量

Table 4 Contents of soil exchangeable calcium under different vegetation types in 2014 (restoration for 10 years) and 2017 (restoration for 13 years)

植物恢复方式 Vegetation restoration type	2014	2017
耕地 Cropland	3.28±0.14	2.46±0.39
人工林 Plantation forest	3.30±0.16A	2.32±0.15B
牧草地 Grassland	3.60±0.48	2.60±0.18
人工林+牧草 Combination of plantation forest and grassland	3.82±0.50	2.67±0.24
撂荒地 Natural grassland	3.80±0.38A	2.52±0.16B

同一行不同大写字母 2014 年与 2017 年间差异显著($P < 0.05$)。Different capital letters in the same line indicate significant differences ($P < 0.05$) between 2014 and 2017.

3 讨论

喀斯特由于其独特的地质背景和强烈的岩溶作用, 常形成地表地下二元结构, 成土速率慢, 土层浅薄, 受人为干扰后水土流失严重^[32]。我们前期的研究发现, 喀斯特自然生态系统一经开垦, 土壤养分即表现出急剧流失的特征, 2 年内 SOC 的损失率最高达到 42%^[33]。耕作扰动加速 SOC 丢失主要是由于翻耕干扰会导致大团聚体破碎, 从而导致受团聚体保护的 SOC 释放后迅速矿化^[34]。退耕还林还草通常是以免耕、少耕的保护性植被恢复为主, 能有效

减少耕作扰动,有利于促进团聚体的形成,从而提升 SOC 固持能力。本研究结果也表明,不同植被恢复模式均对土壤 SOC 具有积极的提升作用^[35-37]。贾松伟等^[38]研究发现,在实施退耕还林后 SOC 含量逐渐增加;张俊华等^[39]和安文明等^[40]研究黄土高原半湿润地区植被恢复对土壤肥力质量的影响,结果也表明,植被恢复能够显著提高土壤有机质的含量,这与本文研究结果一致。与 SOC 相比,喀斯特地区植被恢复后土壤 TN 含量提升相对缓慢,这与我们前期的研究结果一致,即喀斯特地区土壤 TN 的恢复要滞后于 SOC^[41],主要是由于喀斯特地区植被在恢复初期通常受 N 限制^[42],且植被在恢复初期主要吸收土壤 N 用于维持自身生物量的增加,因此土壤 TN 提升缓慢。土壤 C/N 通常可作为评估 SOM 质量的重要指标。本文研究结果表明,不同恢复方式下,土壤 C/N 在退耕前后基本没有显著差异,主要是由于植被恢复过程中 C、N 循环耦合^[43]。说明在短期内,植被恢复并没有显著提升 SOM 质量。

与退耕 10 年(2014 年)相比,退耕 13 年(2017 年)后,大部分人工植被恢复方式下土壤 SOC 和 TN 均有所下降。由于在 2015 年至 2016 年研究区连续两年发生非常严重的洪涝灾害,持续时间长,导致研究区洼地持续长时间淹水,这可能是 SOC 和 TN 下降的主要原因。研究表明,土壤有机质和养分的积累主要来自于凋落物的归还,即植物通过光合作用将大气中的 C 固定到植物中,然后以凋落物形式将 C 和养分逐步补偿给土壤^[44]。因此,凋落物分解能促进土壤 C、N 积累^[45]。然而,本研究却发现,土壤 C、N 储量与凋落物量、凋落物 C、N 均无相关关系。Li 等^[11]认为,相比于 C、N 输入来源,土壤稳定能力可能是影响土壤 C、N 固持的重要原因,这是因为,当土壤 C、N 的稳定能力较弱时,通过凋落物输入的 C、N 同样会丢失。本文相关分析性结果表明,土壤中的交换性钙(Ca^{2+})与 C、N 紧密相关。当土壤交换性钙高时,多价阳离子可以充当黏土矿物与腐殖物质之间的键桥,即黏粒-多价阳离子-有机质的结合可形成稳定的有机-矿质复合体,提升土壤 C、N 的稳定性,从而有利于土壤 C、N 固持^[46-47]。由于土壤交换性钙在水环境中活性会显著提高,迁移能力增强^[48-49],持续受到淹水时会加速交换性钙的丢失。本研究发现,与淹水前(2014 年)相比较,淹水后(2017 年),不同植物恢复方式下土壤交换性钙均显著下降,因此,淹水造成土壤交换性钙淋失可能是导致 SOC 和 TN 下降的重要原因。另一方面,在退水阶段,土壤 C、N 可能随水和土壤颗粒迁移流失,

同样会导致土壤 C、N 减少^[50]。不同植物恢复方式之间,相比于植被恢复,耕地 SOC 和 TN 下降最多,表明喀斯特地区植被恢复能在一定程度上抵抗洪涝灾害带来的负面影响。

本研究结果发现,自然恢复下 SOC 和 TN 随着退耕年限的增加而持续上升,表明自然恢复对极端气候事件的抵抗力和恢复力更好。自然恢复和人工恢复在人为管理、物种组成、根系数量和质量上存在很大的差异^[51-53],因此,其对土壤 C、N 的固持能力常表现很大的差异。在黄土高原的研究表明,相比人工恢复,自然恢复更有利于土壤 C 固持^[54-55]。本研究中,人工恢复生态系统对极端气候灾害的抵抗力和恢复力较弱,原因主要有以下几个方面:1)人工恢复植被下受到人为干扰大(牧草刈割,人为扰动等),土壤有机质矿化过程较为强烈,因此土壤 C、N 含量较低;2)土壤养分在人工植被恢复初期主要用于植被生长,如维持人工林和牧草的持续生长,从而导致在植被恢复初期土壤养分累积能力较弱^[56];3)人工植被物种多样性低,群落结构单一,土壤生物易受环境扰动。相反,自然恢复下因没有人为干扰,物种多样性高的群落可以为土壤生物提供更多共存的生境,土壤生物多样性较高,从而能有效缓冲连续淹水对土壤食物网的负面影响,有利于群落的稳定^[57]。此外,自然植被下因不同的植物有不同的策略来抵御淹水干扰,从而能有效维持土壤活力,提升土壤 C、N 固持^[58]。最近的研究表明,我国西南地区极端气候事件呈现逐渐增强趋势,且广西发生洪水和干旱的风险及强度将逐年增高^[19],气候变化引起的洪涝和干旱风险的增加可能会降低区域土壤 C、N 含量;同时,处于植被恢复初期的喀斯特生态系统可能会再次退化。综上所述,短期内,相比人工恢复,自然恢复更能抵抗极端气候灾害对生态系统可能带来的负面影响。

4 结论

本文以耕地为对照,以人工林、牧草地、人工林+牧草、撂荒地 4 种植被恢复方式为研究对象,分析不同恢复方式 SOC 和 TN 储量在不同退耕年限下的变化特征。结果表明:1)植被恢复能有效提升桂西北喀斯特地区 SOC 和 TN 储量,但 TN 的恢复滞后于 SOC。2)短期内,相比于人工恢复,自然恢复更有利于提升 SOC 和 TN 固持。3)在极端气候灾害事件下,耕地土壤 C、N 丢失量最多,植被恢复能在一定程度上抵抗洪涝灾害的影响,尤其以自然恢复模式下效果最好。综上可知,在桂西北喀斯特退化区域

实行植被恢复,尤其是自然恢复是切实可行的生态恢复措施。

参考文献 References

- [1] STOCKMANN U, ADAMS M A, CRAWFORD J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 80–99
- [2] DENG L, LOU G B, SHANGGUAN Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' program: A synthesis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544–3556
- [3] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627
- [4] MUELLER K E, HOBBIE S E, TILMAN D, et al. Effects of plant diversity, N fertilization, and elevated carbon dioxide on grassland soil N cycling in a long-term experiment[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1249–1261
- [5] 刘兴华, 公彦庆, 陈为峰, 等. 黄河三角洲自然保护区植被与土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(11): 1720–1729
LIU X H, GONG Y Q, CHEN W F, et al. C, N and P stoichiometry of typical plants and soils in the Yellow River Delta Natural Reserve[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(11): 1720–1729
- [6] MUDGE P L, SCHIPPER L A, BAISDEN W T, et al. Changes in soil C, N and $\delta^{15}\text{N}$ along three forest-pasture chronosequences in New Zealand[J]. *Soil Research*, 2014, 52(1): 27–37
- [7] ALBALADEJO J, ORTIZ R, GARCIA-FRANCO N, et al. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(2): 265–277
- [8] LI D J, NIU S L, LUO Y Q. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: A meta-analysis[J]. *New Phytologist*, 2012, 195(1): 172–181
- [9] FENG W T, LIANG J Y, HALE L E, et al. Enhanced decomposition of stable soil organic carbon and microbial catabolic potentials by long-term field warming[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4765–4776
- [10] LUO Y Q, SU B, CURRIE W S, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide[J]. *BioScience*, 2004, 54(8): 731–739
- [11] LI D J, WEN L, ZHANG W, et al. Afforestation effects on soil organic carbon and nitrogen pools modulated by lithology[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 400: 85–92
- [12] KAISER M, ELLERBROCK R H, WULF M, et al. The influence of mineral characteristics on organic matter content, composition, and stability of topsoils under long-term arable and forest land use[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G2): G02018, doi: 10.1029/2011JG001712
- [13] DENG L, SHANGGUAN Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 151–165
- [14] 王志齐, 杜兰兰, 赵慢, 等. 黄土区不同退耕方式下土壤碳氮的差异及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 716–722
WANG Z Q, DU L L, ZHAO M, et al. Differences in soil organic carbon and total nitrogen and their impact factors under different restoration patterns in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 716–722
- [15] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(5): 595–608
GU X, ZHANG S J, LIU Z D, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon concentration and density in the mid-subtropical region of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(5): 595–608
- [16] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, et al. *Climate Change[R]. Synthesis Report. IPCC*, 2014
- [17] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土流失及防治研究[J]. *地球学报*, 2014, 35(5): 535–542
JIANG Z C, LUO W Q, DENG Y, et al. The leakage of water and soil in the Karst peak cluster depression and its prevention and treatment[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2014, 35(5): 535–542
- [18] 王克林, 岳跃民, 马祖陆, 等. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7098–7102
WANG K L, YUE Y M, MA Z L, et al. Research and demonstration on technologies for rocky desertification treatment and ecosystem services enhancement in Karst peak-cluster depression regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7098–7102
- [19] 傅伯杰, 田汉勤, 陶福祿, 等. 全球变化对生态系统服务的影响[J]. *中国基础科学*, 2017, 19(6): 14–18
FU B J, TIAN H Q, TAO F L, et al. The impact of global change on ecosystem services[J]. *China Basic Science*, 2017, 19(6): 14–18
- [20] 王世杰, 刘再华, 倪健, 等. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展[J]. *地球与环境*, 2017, 45(1): 2–9
WANG S J, LIU Z H, NI J, et al. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in Karst area of south China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(1): 2–9
- [21] WEN L, LI D J, YANG L Q, et al. Rapid recuperation of soil nitrogen following agricultural abandonment in a Karst area, southwest China[J]. *Biogeochemistry*, 2016, 129(3): 341–354
- [22] YANG L Q, LUO P, WEN L, et al. Soil organic carbon accumulation during post-agricultural succession in a Karst area, southwest China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37118
- [23] HU P L, LIU S J, YE Y Y, et al. Effects of environmental factors on soil organic carbon under natural or managed vegetation restoration[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 387–397
- [24] 张耀华, 王勇, 张荣飞, 等. 喀斯特地区不同退耕类型对土壤碳氮的影响[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2017, 39(4): 95–100
ZHANG Y H, WANG Y, ZHANG R F, et al. Effects of different types of reforestation on characteristics of SOC and TN

- in Karst areas[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2017, 39(4): 95–100
- [25] LIU M X, XU X L, SUN A Y, et al. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes?[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(6): 064002
- [26] PEÑUELAS J, SARDANS J, RIVAS-UBACH A, et al. The human-induced imbalance between C, N and P in earth's life system[J]. Global Change Biology, 2012, 18(1): 3–6
- [27] 刘光祚, 蒋能慧, 张连第. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996
- LIU G S, JIANG N H, ZHANG L D. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996
- [28] BREMNER J M. Nitrogen-Total[M]//PAGE A L, MILLER R H, KEENEY D R. Methods of Soil Analysis Part 3 — Chemical Methods. Madison: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1996: 1085–1121
- [29] WEN L, LI D J, YANG L Q, et al. Rapid recuperation of soil nitrogen following agricultural abandonment in a karst area, southwest China[J]. Biogeochemistry, 2016, 129(3): 341–354
- [30] HU P L, ZHANG W, XIAO L M, et al. Moss-dominated biological soil crusts modulate soil nitrogen following vegetation restoration in a subtropical karst region[J]. Geoderma, 2019, 352: 70–79
- [31] ISO. ISO11272: 1998 Soil Quality-determination of Dry Bulk Density[S]. Zagreb: Croatian Standards Institute, 1998
- [32] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5): 41–43
- YUAN D X. On the environmental and geologic problems of Karst mountains and rocks in the South-West China[J]. World Sci-Tech R & D, 1997, 19(5): 41–43
- [33] 张伟, 陈洪松, 苏以荣, 等. 不同作物和施肥方式对新垦石灰土土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 925–930
- ZHANG W, CHEN H S, SU Y R, et al. Effects of reclamation and fertilization on calcareous soil fertility in the initial period of cultivation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(4): 925–930
- [34] 叶莹莹, 肖霜霜, 王克林, 等. 耕作干扰下喀斯特土壤有机碳损失主要途径及其影响因素[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(2): 325–332
- YE Y Y, XIAO S S, WANG K L, et al. Pathways and influencing factors of soil organic carbon loss under tillage disturbance in karst area, China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(2): 325–332
- [35] 常恩福, 李娅, 李品荣, 等. 岩溶山地不同植被恢复模式和年限土壤养分的变化[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(2): 76–82
- CHANG E F, LI Y, LI P R, et al. Changes of soil nutrients under different vegetation restoration patterns and age limit in Karst mountain[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2018, 38(2): 76–82
- [36] 段亚峰, 王克林, 冯达, 等. 典型喀斯特小流域土壤有机碳和全氮空间格局变化及其对退耕还林还草的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1560–1568
- DUAN Y F, WANG K L, FENG D, et al. Response of the spatial pattern of soil organic carbon and total nitrogen to vegetation restoration in a typical small karst catchment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1560–1568
- [37] 郭二辉, 孙然好, 陈利顶, 等. 河岸带不同植被类型对土壤有机碳和全氮分布特征的影响——以北京地区温榆河为例[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1315–1321
- GUO E H, SUN R H, CHEN L D, et al. Effects of riparian vegetation on soil organic carbon and total nitrogen distribution — A case study of Wenyu River, Beijing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(10): 1315–1321
- [38] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明. 黄土丘陵区退耕撂荒对土壤有机碳的积累及其活性的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 78–80
- JIA S W, HE X B, CHEN Y M. Effect of land abandonment on soil organic carbon sequestration in loess hilly areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 78–80
- [39] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 38–41
- ZHANG J H, CHANG Q R, JIA K L, et al. Effect of plant restoration to soil fertility quality on loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(4): 38–41
- [40] 安文明, 韩晓阳, 李宗善, 等. 黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分剖面变化的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4852–4860
- AN W M, HAN X Y, LI Z S, et al. Effects of different vegetation restoration types on the slope difference of soil water content in the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4852–4860
- [41] HU P L, LIU S J, YE Y Y, et al. Soil carbon and nitrogen accumulation following agricultural abandonment in a subtropical Karst region[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 132: 169–178
- [42] ZHANG W, ZHAO J, PAN F J, et al. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China[J]. Plant and Soil, 2015, 391(1/2): 77–91
- [43] XU X, LI D J, CHENG X L, et al. Carbon: Nitrogen stoichiometry following afforestation: A global synthesis[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19117
- [44] 左巍, 贺康宁, 田赞, 等. 青海高寒区不同林分类型凋落物养分状况及化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2271–2278
- ZUO W, HE K N, TIAN Y, et al. Surface litter stoichiometry for five forest types in alpine region, Qinghai, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9): 2271–2278
- [45] 高志红, 张万里, 张庆费. 森林凋落物生态功能研究概况及展望[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(6): 79–80
- GAO Z H, ZHANG W L, ZHANG Q F. General situation and prospect for the research on ecological functions of forest litter[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2004, 32(6): 79–80
- [46] 靳振江, 程亚平, 李强, 等. 会仙喀斯特溶洞湿地、稻田和旱田土壤有机碳含量及其与养分的关系[J]. 湿地科学, 2014, 12(4): 485–490
- JIN Z J, CHENG Y P, LI Q, et al. Content of soil organic

- carbon and its relationship with nutrients in Karst cave wetlands, paddy fields and dry farmlands in Huixian[J]. *Wetland Science*, 2014, 12(4): 485–490
- [47] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 37–44
CAO J H, YUAN D X, PAN G X. Some soil features in Karst ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(1): 37–44
- [48] 张甘霖, 龚子同. 淹水条件下土壤中元素迁移的地球化学特征[J]. *土壤学报*, 1993, 30(4): 355–365
ZHANG G L, GONG Z T. Geochemical characteristics of elemental migration in soils under submerged condition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(4): 355–365
- [49] 殷超, 周忠发, 田袁琿, 等. 岩溶地区主量元素地球化学特征及其迁移规律——以贵州双河洞为例[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 303–311
YIN C, ZHOU Z F, TIAN Z H, et al. The geochemical characteristics and migration of major elements in Karst area — Taking Shuanghe Cave in Guizhou as an example[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 303–311
- [50] 高儒学, 戴全厚, 甘艺贤, 等. 不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失特征研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1072–1084
GAO R X, DAI Q H, GAN Y X, et al. Characteristics of nutrient loss from sloping farmland in Karst region as a function of rainfall intensity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1072–1084
- [51] LAGANIÈRE J, ANGERS D A, PARÉ D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 439–453
- [52] SOLL Y E F, SCHÖNING I, BOCH S, et al. Factors controlling decomposition rates of fine root litter in temperate forests and grasslands[J]. *Plant and Soil*, 2014, 382(1/2): 203–218
- [53] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 等. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2163–2172
LIU Y L, ZHU G Y, DENG L, et al. Effects of natural vegetation restoration and afforestation on soil carbon and nitrogen storage in the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2163–2172
- [54] WEI X R, SHAO M G, FU X L, et al. Distribution of soil organic C, N and P in three adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China[J]. *Biogeochemistry*, 2009, 96(1/3): 149–162
- [55] JIN Z, DONG Y S, WANG Y Q, et al. Natural vegetation restoration is more beneficial to soil surface organic and inorganic carbon sequestration than tree plantation on the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 485/486: 615–623
- [56] ECLESIA R P, JOBBAGY E G, JACKSON R B, et al. Stabilization of new carbon inputs rather than old carbon decomposition determines soil organic carbon shifts following woody or herbaceous vegetation transitions[J]. *Plant and Soil*, 2016, 409(1/2): 99–116
- [57] WAGNER D, EISENHAEUER N, CESARZ S. Plant species richness does not attenuate responses of soil microbial and nematode communities to a flood event[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89: 135–149
- [58] VOESENEK L, BAILEY-SERRES J. Flooding tolerance: O₂ sensing and survival strategies[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, 16(5): 647–653