中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 8 期： 3149–3157
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

中国西南喀斯特地区植被生长受土壤体积限制

潘婉婷[1]，李新攸[2]，李子栋[1]，桂正扬[1]，刘鸿雁[1*]

1. 北京大学城市与环境学院，植被结构功能与建造全国重点实验室，北京 100871
2. 西北农林科技大学资源环境学院，杨凌 712100
* 通讯作者，E-mail: lhy@urban.pku.edu.cn

2025-09-07收稿，2026-04-06修回，2026-05-27接受，2026-07-17网络版发表
国家自然科学基金项目(41571130044)资助

摘要 中国植被变绿处于全球领先地位，其中在西南喀斯特地区开展的植树造林工程发挥了重要作用。西南喀斯特地区由于强烈土壤侵蚀和石漠化，土壤体积通常较小。同时，尽管植物可利用土壤中的养分浓度通常足够高，但植被生长仍然存在养分限制。然而，尽管局地尺度观察到了土壤体积对养分储量和植被生长潜力的可能限制，但仍然未见区域尺度的评估，土壤体积限制植被生长的阈值不明。为了探究植被生长潜力、土壤体积和土壤养分浓度之间的关联，本文整合了中国西南部喀斯特地区500余条实地调查记录的数据集，涵盖该区域主要气候和植被类型。本文采用了XGBoost模型和网络分析来揭示植被生长潜力与环境因子关联性的变化，结果表明，土壤体积对植被生长潜力的贡献超过了气候因子和土壤养分浓度的贡献，可解释约70%植被生长潜力的空间变异性。本文进一步确定57.5 cm的土壤厚度是土壤体积限制植被生长的阈值。随土壤厚度降低至这一阈值，植被的限制因子从土壤养分浓度转变为土壤体积，同时气候因子对植被生长的影响更显著。本研究表明，土壤体积是喀斯特植被生长潜力的主要限制因素，不断加剧的土壤侵蚀与石漠化是当前植被恢复工程可持续性的重大挑战。

关键词 喀斯特，土壤体积，土壤厚度，土壤养分浓度，植被生长潜力，植被体积

1 引言

中国在引领全球植被变绿(Chen等，2019)，其中西南喀斯特地区的植树造林活动在过去数十年贡献了全球植被增长的5%，并为当地碳封存贡献了32%(Brandt等，2018；Tong等，2020；Xu等，2023)。然而，中国西南喀斯特地区约有60%的面积土壤侵蚀严重(Liu H Y等，2021；D'Ettorre等，2024)。碳酸盐岩的化学风化产生大量岩石裂隙，土壤在径流冲刷下沿地下裂隙流失，加剧土壤侵蚀(Liu H Y等，2021；Wang等，2022；Chen等，2024；Jing等，2025)。在中国西南喀斯特地区高强度土地利用的背景下，该现象进一步加剧(D'Ettorre等，2024)。土壤侵蚀会减小土壤体积并改变养分动态，进而可能显著降低养分有效性(Liu等，2020)。这给植被的可持续性与碳汇功能带来持续挑战，尤其是在更易受环境波动影响的幼龄人工林中(Zhang X M等，2022；He等，2025)。因此，评估土壤的减少对植被生长潜力的影响已成为中国西南喀斯特地区植被恢复工程可持续性的关键研究内容。

在土壤体积受限的条件下，土壤中植物可利用养分的浓度与储量均可能成为调控植被生长潜力的关键因子。喀斯特地区已有大量研究证实，区域植被普遍受到氮限制或磷限制(Du等，2011；Geekiyanage等，2019)。现有研究多认为，土壤有效养分浓度是制约喀斯特植被生长潜力的主要因素，尤其在土层较厚的生境中更为突出(Liu等，2020；Zhang L等，2022；Wei等，2023)。然而，与植被生长潜力随土壤体积减小而降低的趋势相反(Yue等，2024)，随着土壤体积下降，凋落物富集效应与岩石

中文引用格式：潘婉婷, 李新攸, 李子栋, 桂正扬, 刘鸿雁. 2026. 中国西南喀斯特地区植被生长受土壤体积限制. 中国科学: 地球科学, 56(8): 3149–3157, doi: 10.1360/N072025-0508
英文引用格式：Pan W, Li X, Li Z, Gui Z, Liu H. 2026. Karst greening is challenged by reduced soil volume in Southwest China. Science China Earth Sciences, 69(8): 3102–3109, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1973-1

© 2026《中国科学》杂志社

风化下元素的释放往往使土壤养分更加集中(Liu等，2020；Liu H Y等，2021；D'Ettorre等，2024；Li等，2025)。此外，尽管喀斯特植被的养分限制类型存在较强空间异质性(Zhang等，2015；Geekiyanage等，2019)，不同植被类型下土壤有效养分浓度差异却相对较小(Deng等，2010)。上述现象共同表明，当前对土壤体积受限背景下养分浓度动态如何调控植被养分限制的认识仍不充分。由此推测，受土壤体积调控的养分储量可能是驱动喀斯特地区植被养分限制的另一重要机制(Xiao等，2024；Yue等，2024)。受基岩风化特征与人类活动扰动共同影响(Liu H Y等，2021；Wang等，2022；D'Ettorre等，2024)，喀斯特地区广泛发生的土壤侵蚀及其导致的土壤体积减小，可能显著削弱土壤的养分储存能力(Liu等，2020)，进而限制植被生长(Zhang S等，2022)。同时，土壤体积减小也会降低土壤持水能力(Jiang等，2020；Zhang S等，2022)，改变植物水分传导效率并抑制养分吸收(Wan等，2025)，进一步加剧植被养分限制。目前，植被由养分浓度限制向养分储量限制转变的内在机制仍不明确，这在土壤侵蚀与石漠化持续加剧的背景下，对区域植被恢复工程的实施构成了严峻挑战。

土壤厚度的阈值效应有助于阐明养分浓度与储量对植被的共同影响。土壤厚度对植被生长的调控作用在土层较薄时表现得更为显著，这一规律已通过野外观测、模型模拟与遥感分析等手段，在多个喀斯特地区得到验证(Zhong等，2022；Zhang S等，2022；Liu等，2023；Yue等，2024；Deng等，2025)。随着土壤体积增加，土壤厚度对植被的影响趋于稳定(Yue等，2024)，这说明限制因素可能从土壤体积转变为养分浓度，而后者对非喀斯特植被的限制作用尤为显著(Wieder等，2015)。然而，这一土壤厚度阈值的大小仍存在争议，范围从0 cm(即裸岩)、10–20 cm到40 cm不等(Hou等，2024；Yue等，2024)。这种不确定性可能是由于此前对土壤厚度阈值研究的空间范围普遍较小。此外，土壤厚度的评估也主要依赖于局地尺度的方法，如钻探、剖面挖掘和土壤探测(Zhang X等，2025)。尽管一些考虑了空间异质性的新方法正在发展，包括基于地貌学的方法、地球物理方法和机器学习方法，但它们在区域尺度上的应用仍然相对有限(Patton等，2018；Fang等，2025；Jiang等，2025；Zhang X等，2025)。因此，有必要通过整合土壤厚度数据集进行更多的区域尺度研究，确定影响植被生长的土壤厚度精确阈值。

为了明确土壤体积受限情况下喀斯特地区植被生长潜力的限制因子，并为区域森林管理提供科学依据，本文整合了一个超过500条天然植被实地调查记录的数据集，涵盖中国西南喀斯特地区主要气候和植被类型。通过剖面挖掘确定的土壤厚度作为土壤体积的替代指标，以木本植被体积作为植被生物量积累与植被生长潜力的代用指标，本文确定土壤厚度对木本植被体积的影响出现显著转变的土壤厚度阈值，阐明植被生物量积累、土壤厚度以及土壤养分浓度之间的关联及其变化。本文旨在验证以下假说：在喀斯特地区，土壤体积对植被生物量积累的影响存在阈值效应，植被生长的限制因素随着土壤厚度的递减由土壤养分浓度转向土壤体积。

2　研究材料与研究方法

2.1　研究区域

本文研究区为中国西南喀斯特地区(21°30′–31°36′N，98°35′–111°16′E)，该地区分布着连续和不连续的碳酸盐岩层(图1A)，具有多种喀斯特地貌(图1B，geocloud.cgs.gov.cn)，包括喀斯特高原、平原、盆地、山地、丘陵、峰丛洼地、峰林谷地和峡谷(图1B)。该区域地处亚热带和热带气候区，年均温和年降水量分别在3.8–22.7 ℃和820–1862 mm，地带性植被类型分别为亚热带常绿阔叶林和热带季雨林。局地非喀斯特生境中的植被通常以乔木为主，而喀斯特生境中的植被通常发生了退化，以灌木或草本植物占优势(Liu H Y等，2021)。

2.2　数据收集与整合

本文基于2024年9月前的中国知网(CNKI，kns.cnki.net)文献数据，结合中国国家生态系统观测研究网络(CNERN，rs.cern.ac.cn/data)，获取了植被和土壤的实地调查数据。使用实地调查数据是由于研究区域的高度异质性(刘鸿雁等，2019；Li等，2022；Wang等，2022)。喀斯特生境的识别依据为实地调查记录的碳酸盐岩基岩及当地喀斯特地貌的发育情况(网络版附录数据集S1)。

为评估植被生长潜力，本文收集了木本植被体积(*vegeVolume*)的实地调查数据，其计算方法如下：

$$vegeVolume = \text{植被覆盖度} \times \text{植被高度} \quad (1)$$

式中，植被覆盖度和植被高度分别指的是木本植被的冠层覆盖度和冠层高度。通过CNKI收集植被覆盖度和植被高度数据时，所使用的关键词为“植物”、“群落组成”，以及研究区域涉及的五个省份/自治区/市之一，包括云南、广西、贵州、重庆和湖北。植被记录对应的土壤体积采用该植被记录中通过剖面挖掘获得的土壤厚度(*soilDepth*)表示。每个省份/自治区/市至少收集3条喀斯特生境与3条非喀斯特生境的植被记录，以涵盖相似气候条件

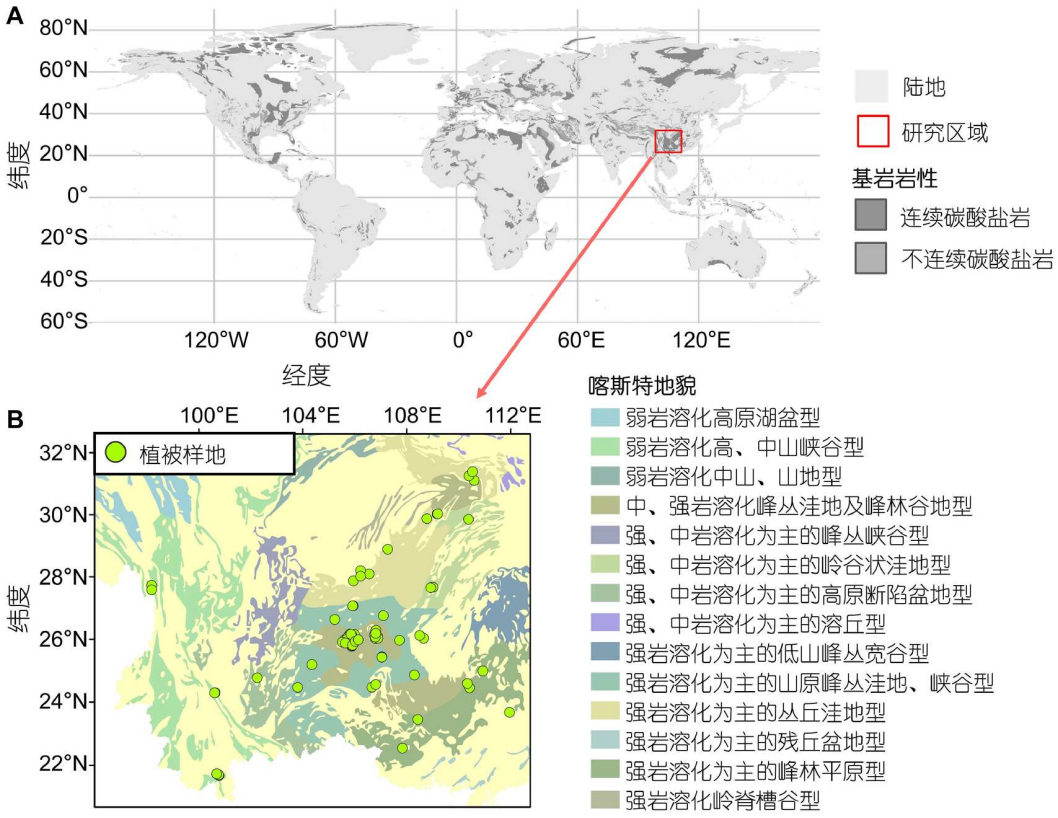


图1　(A)研究区域与(B)研究区域中所选植被样地的空间分布。(A) 深灰色与浅灰色区域分别代表全球范围内连续碳酸盐岩与不连续碳酸盐岩的分布。(B) 植被样地用浅绿色圆形标注。底图为喀斯特地貌分布图(geocloud.cgs.gov.cn)，地貌用不同颜色表示。浅黄色区域代表非喀斯特地区

下不同的土壤体积条件。重庆市的所有5条植被记录的基岩都由碳酸盐岩和砂岩共同组成，后者通常会形成更厚的土壤(Liu H Y等，2021)。为了反映天然植被的生长条件，本文只选取了原生植被或次生演替时间超过5年的自然更新植被。同时，本文排除了草本植被、人工植被或受到强烈人类活动扰动的植被，仅保留了人类活动影响较弱的森林或灌木植被，以避免植物生活型或环境扰动带来的影响，因为草本植被通常形成于植被演替早期，此时人类活动的影响可能仍然存在(D'Ettorre等，2024)。本文还整合了CNERN数据集中云南哀牢山站、云南西双版纳站和湖北神农架站的植被调查记录，这些站点都包含喀斯特和非喀斯特两种生境背景的实地调查记录(图1B，附录数据集S1)。植被数据整合共涉及35项森林或灌木植被的研究，包含41个样地、多种地形条件下525条植被覆盖度或植被高度记录(附录数据集S1)，最终形成56条有效的木本植被体积数据。植被数据的对应气候条件包括年均温(MAT)和年降水量(MAP)，根据样地的经纬度坐标从WorldClim数据库中获取(Fick和Hijmans，2017)。

对未进行土壤采样的植被记录，本文从CNKI中收集了土壤养分浓度数据进行匹配。所使用的关键词为"土壤"、"养分"、"化学性质"，以及样地相关地名。本文首先按样地中的地块对植被记录和土壤养分浓度记录进行匹配。对于无法按地块进行匹配的植被记录，本文选择了具有相同样地和基岩条件(即喀斯特或非喀斯特)的土壤养分记录，以确保相似的土壤体积条件与养分条件。匹配过程同时考虑了植被类型、植物生活型、地形条件和海拔。当同一植被记录匹配到多条土壤养分记录时，取养分条件的均值。土壤养分浓度记录包括表土(即淋溶层或土壤剖面的0–20 cm层)中的土壤有机质(SOM)、总氮(TN)、总磷(TP)、有效氮(AN)和有效磷(AP)的浓度。在土壤厚度低于20 cm的站点中，土壤养分条件按所有土壤层的养分浓度以土层厚度为权重取均值。土壤养分浓度数据涉及了64项研究，包含309条土壤养分浓度记录(附录数据集S1)。

2.3　统计分析

为了探究木本植被体积、土壤厚度与其他环境因子之间的关联性，本文采用回归分析与基于极致梯度提升算法的梯度提升回归树模型(XGBoost)进行统计分析。环

境因子包括土壤厚度、土壤养分浓度与气候因子。首先，本文使用单变量线性回归探究木本植被体积与环境因子之间的关系。在此基础上，为了阐明多变量模型中相互影响的环境因子对植被生长潜力的独立贡献，本文对木本植被体积和环境因子建立了XGBoost模型。选择XGBoost模型的原因是它能够处理相对较小的样本量(n=56)以及环境因子的部分数据缺失(附图S1；Chen和Guestrin，2016)。模型训练的优化目标为最小化模型的均方根误差(RMSE)，模型最大深度为4。环境因子的变量重要性通过该因子对模型RMSE减少的百分比贡献进行衡量。本文还纳入了XGBoost模型中环境因子的出现频率以辅助表现环境因子的贡献。同时，基于所有环境因子在分布范围内均匀采样后产生的模型预测，本文通过LOESS平滑估计各环境因子的平均偏效应(附图S2)。根据LOESS平滑所揭示的土壤厚度-木本植被体积模式，本文进一步采用了具有1个断点的分段线性回归拟合土壤厚度的平均偏效应，以体现阈值效应。阈值使用Davies检验(Davies，2002)进行统计检验。

为了进一步揭示土壤厚度阈值以下和阈值以上木本植被体积与环境因子之间的关联，本文对所有变量进行了基于相关分析的网络分析。为了适用于非正态分布的变量，本文采用了Spearman相关分析(附图S3)，并将各变量作为网络节点，关联强度(即相关系数的绝对值)作为边的权重。不显著的变量相关性(P≥0.05)均未包含在网络构建中。本文采用了节点连接强度(即与该节点相连的边的权重和)以评估网络中各节点的节点连接度(Barrat等，2004)。节点按照力导向算法进行排布，从而关联强度较高的节点之间位置更近，并且位于网络中间的节点通常在整个网络中起重要作用(Fruchterman和Reingold，1991)。此外，为了确定与木本植被体积关联性更强的环境因子，本文分别依据Louvain算法(Blondel等，2008)和Walktrap算法(Pons和Latapy，2005)将网络划分为不同模块。两种算法得出的模块划分完全相同。本文对该模块划分的模块度进行了评估，模块度高于约0.3表示具有显著的模块化结构(Clauset等，2004)。本文还计算了包含木本植被体积的模块内部各节点的节点连接度，以确定环境因子在该模块中的相对重要性。

模型构建与统计分析在R 4.2.2(R核心团队2012，奥地利)中完成，所使用的软件包包括“nariar”包(版本1.1.0)、“xgboost”包(版本1.7.11.1)、“pdp”包(版本0.8.2)、“segmented”包(版本2.0-1)以及“igraph”包(版本2.1.4)。本文绘图在R中使用以下软件包完成：“ggplot2”、“ggspatial”、“ggraph”、“tidygraph”和“ggcorrplot”。

3　结果

3.1　木本植被体积与气候和土壤因子之间的关联性

由土壤厚度表示的土壤体积在亚热带和热带喀斯特地貌区域的木本植被体积变异性中发挥了重要作用(图2，附图S2)。在单变量回归模型中(附图S2A–S2H)，土壤厚度对木本植被体积具有显著且强烈的正向影响(P<0.001)，R^2为69.78%(附图S2A)。大多数气候因子及土壤养分浓度的影响均不显著(P≥0.05，附图S2B，S2D–S2G)，只有MAP和AP具有显著影响，但R^2也较低(分别为17.25%和14.25%，附图S2C和S2H)。在包含变量交互作用的XGBoost模型中，土壤体积也在解释木本植被体积变化上发挥了主导作用(图2A和2B)。在变量重要性和模型中的出现频率上，土壤厚度均位列第一(图2A和2B)。土壤厚度的变量重要性超过0.8，约为排名第二的土壤养分浓度因子AP的7倍(变量重要性0.125，图2A)。其他环境因子的变量重要性均小于0.05(图2A)。就环境因子的出现频率而言，气候因子起到了次要作用，其中MAT和MAP分别位列第二和第三(图2B)。TP在环境因子的出现频率中排名第四，是土壤养分浓度中出现频率排名第一的变量(图2B)。

在XGBoost模型中，土壤厚度对木本植被体积的平均偏效应(图2C)总体上为正向，这与对应单变量模型中的趋势一致(附图S2A)。LOESS平滑拟合显示存在一个约60 cm处的阈值，分段线性回归进一步确定阈值为57.5 cm (95%置信区间：52.3–62.6 cm，P<0.001，图2C)。当土壤厚度从高于57.5 cm转变为低于57.5 cm时，土壤厚度对木本植被体积的平均偏效应从0.0224 $m^3\ m^{-2}\ cm^{-1}$的较弱效应转变为0.2104 $m^3\ m^{-2}\ cm^{-1}$的强效应，这凸显了土壤体积较小时土壤厚度对木本植被体积的强烈影响。土壤厚度的强烈影响也通过土壤厚度的平均偏效应中木本植被体积的变化范围得到了体现，随土壤厚度从0 cm增加到110 cm，木本植被体积的增加超过10 $m^3\ m^{-2}$(图2C，附图S2I)。相比之下，其余环境因子的影响较弱，木本植被体积在这部分平均偏效应中的变化均小于5 $m^3\ m^{-2}$(附图S2J–S2P)。

3.2　土壤体积较大与较小情况下木本植被体积限制因子的耦合与解耦

网络分析显示，从土壤体积较大(土壤厚度≥57.5 cm，n=33)的情况转变为土壤体积较小(土壤厚度<57.5 cm，n=186)时，与木本植被体积关联的环境因子由土壤养分浓度转变为土壤体积(图3A–3D)。在两种情况下的相关网络中，变量均被分为两个模块：植被体积

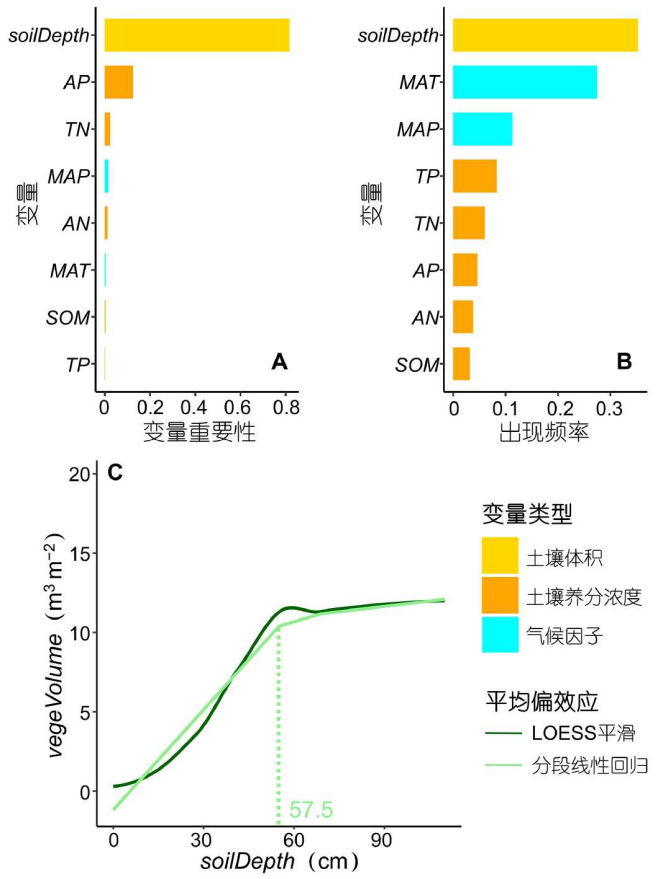


图2 使用极致梯度提升算法的梯度提升回归树模型(XGBoost)中环境因子的(A)变量重要性与(B)出现频率，及(C)模型中土壤厚度(*soilDepth*)对木本植被体积(*vegeVolume*)的平均偏效应。(A、B) XGBoost模型中环境因子的变量重要性与出现频率按降序排列。变量重要性使用该变量对模型均方根误差减少的百分比贡献表征。指征土壤体积、土壤养分浓度与气候因子的环境因子分别用金色、橘色与青色的柱状图表示。其中土壤体积用土壤厚度指征。指征土壤养分浓度的因子包括土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、有效氮(AN)与有效磷(AP)的浓度。气候因子包括年均温(MAT)与年降水量(MAP)。(C) 深绿色与浅绿色曲线分别代表使用LOESS平滑和分段线性回归拟合的土壤厚度对木本植被体积的平均偏效应。分段线性回归的断点使用浅绿色虚线标出并标明数值

耦合模块与植被体积解耦模块(图3A和3C)，并具有中等水平的网络模块度(分别为0.296和0.266)。在土壤体积较大时，植被体积耦合模块由木本植被体积、土壤厚度及土壤养分浓度变量组成，其中土壤养分浓度包括SOM、TN、TP和AP(图3C)。在该模块内部，土壤养分浓度表现出最高的节点连接度，其中SOM和TN分别在节点连接度中位列第一和第二，而土壤厚度排名第三，与TP和AP的节点连接度相当(图3D)。然而，在土壤体积较小时，植被体积耦合模块仅包含土壤养分浓度变量中的TP(图3A)，其在模块内的节点连接度排名最低(图3B)。大多数表征土壤养分浓度的变量都聚集在植被体积解耦模块中(图3A)。相比之下，土壤厚度在植被体积耦合模块内的节点连接度排名第二，在环境因子中排名最高(图3B)。

值得注意的是，在土壤体积较小时，气候因子与木本植被体积的关联比在土壤体积较大时更为密切。在土壤体积较大时的网络中，气候因子聚集在植被体积解耦模块中，在网络图中与木本植被体积节点的距离最远，相关性较低(图3C)。相比之下，在土壤体积较小时的网络中，气候因子聚集在植被体积耦合模块中(图3A)。气候因子在模块内的节点连接度也比土壤养分浓度(即TP)更高，仅次于木本植被体积和土壤厚度(图3B)。

4 讨论

4.1 土壤体积对木本植被生长潜力的主导作用及其阈值效应

本文的研究结果表明，在喀斯特地区，木本植被的植被体积主要受土壤体积调控，其土壤厚度阈值为57.5 cm。低于这一阈值时，影响木本植被的植被体积和生长潜力的限制因子由土壤养分浓度转变为土壤体积(图4)。

土壤体积对植被生长潜力的主导性影响可能源于其对土壤养分和水分储存能力的限制。在土壤深厚且远超根系深度的生态系统中(Stocker等，2023)，亚热带与热带植被的动态主要受气候因子控制，并受局地土壤养分浓度的调节(Wieder等，2015；Zhao等，2022)。然而，在喀斯特生境中，碳酸盐岩的化学风化通过引发快速的水文过程导致了广泛的土壤侵蚀(Chen等，2024；Jing等，2025)，使得这一地区土壤体积显著偏小，环境异质性高(Liu H Y等，2021；D'Ettorre等，2024)。沿着土壤流失加剧和土壤体积减小的空间梯度，尽管土壤养分浓度有所增加，但土壤中的养分总储量却在减少(Liu等，2020；Xiao等，2024)，使得喀斯特植被普遍面临养分限制(Du等，2011；Zhang等，2015；Liu等，2020)。因此，在该生境中，土壤体积的调控作用变得更加显著(Xiao等，2024；Yue等，2024)，从而产生了阈值效应：植物可利用养分的储量以及木本植被生长潜力的主要限制因素由土壤养分浓度转变为土壤体积。

此外，喀斯特植被的水分有效性也受到有限的土壤体积与更强的排水过程限制。沿着土壤体积减小的空间梯度，喀斯特木本植被越来越多地与风化基岩产生动态相互作用(Liu H Y等，2021；Zhang J等，2022)。尽管风化基岩贡献了植物所吸收水量的约20%(Liu W等，2021)，但与土壤相比，风化基岩具有更大的粒径与更弱的毛细作用，制约了其储水能力(Beven和Germann，

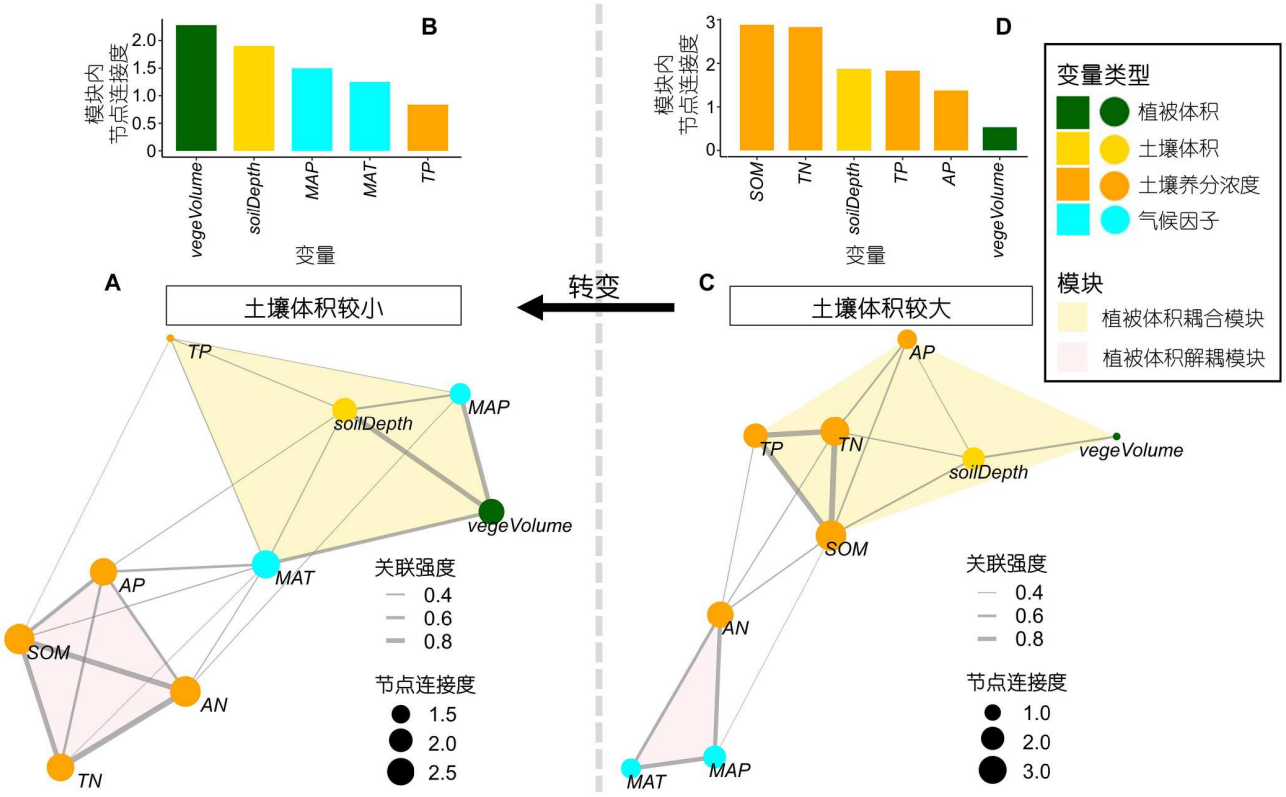


图 3　木本植被体积(*vegeVolume*)与环境因子的相关网络及其中植被体积耦合模块内的节点连接度。(A、B) 土壤体积较小(土壤厚度<57.5 cm)；(C、D) 土壤体积较大(土壤厚度≥57.5 cm)。(A、C) 相关网络中的边代表用Spearman相关系数的绝对值表征的变量间关联。相关性不显著(P≥0.05)的变量关联未绘出。关联强度用边宽度表示，节点代表各变量。各节点在网络中的节点连接度用节点大小表示。指征木本植被体积、土壤体积、土壤养分浓度与气候因子的变量分别用深绿色、金色、橘色与青色的节点表示。每个网络中，节点聚类为两个模块：植被体积耦合模块(黄色)与植被体积解耦模块(粉色)。(B、D) 植被体积耦合模块内的节点连接度按降序排列。指征木本植被体积、土壤体积、土壤养分浓度与气候因子的变量分别用深绿色、金色、橘色与青色的柱状图表示。其中土壤体积用土壤厚度指征。指征土壤养分浓度的因子包括土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、有效氮(AN)与有效磷(AP)的浓度。气候因子包括年均温(MAT)与年降水量(MAP)

1982)。同时，喀斯特地区裂隙丰富的基质促进了快速的排水过程，使得水分储量发生波动(Jiang等，2020；Stocker等，2023)，从而降低了植被生产力和生态系统稳定性(Jiang等，2020；Zhu等，2021，2023)。土壤体积对养分和水分储量的限制决定了其在薄土层的喀斯特地区对植被生长潜力的关键调控作用。

4.2　土壤养分浓度和气候因子对木本植物生长的调控

除土壤体积外，土壤磷浓度也对喀斯特植被构成了次要但持续性的限制(图3)。在亚热带和热带地区，非喀斯特地区面临着广泛的磷限制(Chadwick等，1999；Du等，2020)。在喀斯特地区，磷限制可能会得到一定程度的缓解，因为岩石风化和土壤侵蚀形成了倾斜的地形，能够将雨水和植物凋落物聚集于各个分散的土壤斑块(Li等，2025)，从而在这些斑块中富集有机质与养分(Liu等，2020；Sun等，2023)。然而，富钙的碳酸盐岩释放出的钙离子也会在浅层土壤层中积累，并与磷反应形成不溶性化合物，这会显著降低磷元素对植被的生物有效性，尤其是在土壤体积较小的情况下(Gao等，2019)。因此，无论何种地质和土壤条件，中国西南地区的生态系统普遍受到磷缺乏的制约(Liu等，2014；Wu等，2022)。

此外，与土壤体积较大时相比，在土壤体积较小时，喀斯特植被与气候因子之间的关联更紧密(图4)。这种气候效应的变化可能是由于土壤对温度和水分有效性的缓冲作用(Greiser等，2024；Jing等，2025)。土壤能够调节诸如入渗和蒸发等热物理和水文过程，从而削弱气温和降水带来的波动(Greiser等，2024；Jing等，2025)，并维持植被相对稳定的生长条件。在土壤体积较小时，土壤的缓冲能力减弱，加剧了植被对气候因子的敏感性。更高的气候敏感性可能进一步加剧喀斯特植被在土壤体积受限环境中的脆弱性。

4.3　研究不足与展望

本研究揭示了土壤体积对中国西南喀斯特地区植被

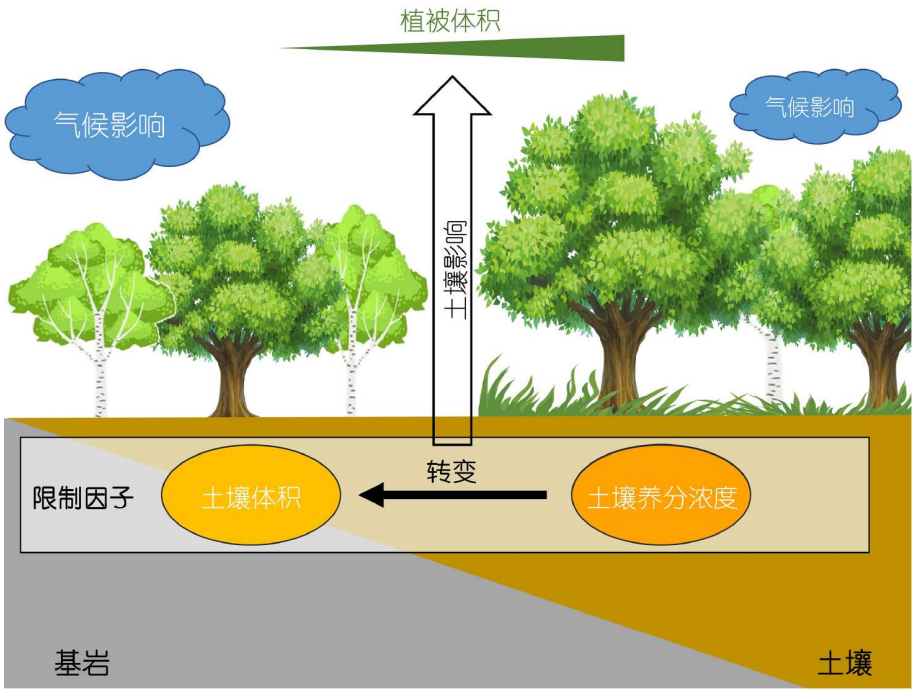


图 4 喀斯特地区木本植被体积的限制因子的转变示意图。随土壤体积由右向左递减，木本植被体积的土壤限制因子由土壤养分浓度转变为土壤体积。深绿色的三角表示木本植被体积随土壤体积降低而减小的趋势。蓝色云朵图案表示在土壤体积较大、较小两种情况下，气候因子对木本植被体积的影响大小变化

生长潜力的阈值效应，显示该地区的植被可持续性存在重要但被低估的风险。本文强调了土壤体积对植被生长的限制作用，并将其纳入传统的以养分浓度为中心的养分限制框架中，为喀斯特生态系统中植被生长潜力特征提供了更为完整的图景。值得注意的是，本研究发现的57.5 cm的土壤厚度阈值远远超过了普遍认知中40 cm或更小的阈值(Hou等，2024；Yue等，2024)，这表明土壤体积的限制作用比此前观测到的更为强烈。同时，更高的土壤厚度阈值，意味着更广泛区域内的喀斯特植被生长潜力持续受到磷限制，并表现出更高的气候敏感性；在中国西南地区极端气候事件频发且强度不断加剧的背景下(贺晋云等，2011)，这一制约效应将对植被可持续生长构成更加严峻的挑战。尽管在CO_2浓度增加、降水增多的前提下，中国西南喀斯特地区的人工林和天然植被的增长潜力被寄予厚望(Zhang M等，2025)，但本研究指出，在岩石风化和当地高强度的人类开发的双重影响下(D'Ettorre等，2024)，该地区广泛受到土壤体积的强烈制约。未来研究需要进一步评估土壤体积受限生境中的植被生长和碳储量在未来气候变化下的可持续性。

本研究仍存在若干局限性，这些局限性也为未来的研究方向提供了参考：(1) 土壤体积是根据连续土壤层的厚度来估算的，并未考虑到岩石裂隙中的土壤或风化岩石层，而这些地下结构同样能通过直接的水分和养分供应满足植被生长需求(刘鸿雁等，2019；Stocker等，2023)。但鉴于土壤层提供了约80%的植被所需水分与大部分养分(Deng等，2010；Liu W等，2021)，本文采用土壤厚度作为简化指标。这也是由于土壤厚度指标在生态研究中广泛应用，具有大量可获取数据(Yue等，2024；D'Ettorre等，2024)。(2) 本研究的土壤厚度测量依赖于剖面挖掘，植被体积则通过木本植被的冠层覆盖度和冠层高度来估算。这两种方法都忽略了土壤分布与植被结构的空间异质性，可能为分析带来不确定性。未来的研究应当采用更先进的测量技术，包括采用基于地貌学的方法和地球物理方法来描述土壤体积与地下结构(Patton等，2018；Fang等，2025；Jiang等，2025；Zhang X等，2025)，以及采用激光探测和测距技术(LiDAR)来进行高分辨率的植被体积估算(Lang等，2023)；同时需要加强数据共享与整合。(3) 尽管本研究涵盖了区域尺度上的多种地形条件，但坡位和坡度对土壤体积、水分和养分留存(Hu等，2015；Xiao等，2023)的影响，以及对植被生长潜力的影响，仍需要进一步研究。(4) 本研究关注人为干扰小的天然木本植被，且假设土壤体积状况保持不变。因此，将这些研究成果应用于受土壤侵蚀动态影响的人工造林管理或草本植被时，需要仔细评估。

5　结论

通过整合中国西南部喀斯特地区的实地调查数据，研究结果表明，土壤厚度主要决定了喀斯特植被的生长潜力，其关键阈值为57.5 cm。随着土壤厚度的降低，对植被生长潜力的主要限制因素从土壤养分浓度转变为土壤厚度。这些发现表明，土壤体积带来的限制与喀斯特植被的脆弱性都比此前的认知更为显著。本研究为中国西南地区基于证据的植被管理决策与可持续森林管理奠定了基础。

致谢　衷心感谢编委与审稿人的宝贵意见。感谢国家生态系统观测研究网络/中国生态系统研究网络科技资源服务平台，特别感谢云南哀牢山生态站、云南西双版纳生态站、湖北神农架站提供数据支撑。也感谢所有数据提供者的宝贵学术分享精神。

补充材料　补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责，详见网络版(http://earthcn.scichina.com)。

参考文献

贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 2011. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征. 地理学报, 66: 1179–1190
刘鸿雁, 蒋子涵, 戴景钰, 等. 2019. 岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖. 中国科学: 地球科学, 62: 1756–1763
Barrat A, Barthélemy M, Pastor-Satorras R, et al. 2004. The architecture of complex weighted networks. Proc Natl Acad Sci USA, 101: 3747–3752
Beven K, Germann P. 1982. Macropores and water flow in soils. Water Resour Res, 18: 1311–1325
Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. 2008. Fast unfolding of communities in large networks. J Stat Mech, 2008: P10008
Brandt M, Yue Y, Wigneron J P, et al. 2018. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China karst during recent decade. Earths Future, 6: 1017–1028
Chadwick O A, Derry L A, Vitousek P M, et al. 1999. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. Nature, 397: 491–497
Chen C, Park T, Wang X, et al. 2019. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nat Sustain, 2: 122–129
Chen J, Fan P, Zhang F, et al. 2024. Distribution mechanisms of soil surface erosion and underground leakage in karst areas of China: A systematic, quantitative review. Catena, 246: 108466
Chen T, Guestrin C. 2016. XGBoost: A scalable tree boosting system. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco. 785–794
Clauset A, Newman M E J, Moore C. 2004. Finding community structure in very large networks. Phys Rev E, 70: 066111
Davies R B. 2002. Hypothesis testing when a nuisance parameter is present only under the alternative: Linear model case. Biometrika, 89: 484–489
Deng Y, Jiang Z, Luo W, et al. 2010. Effects of vegetation restoration on soil nutrient in typical karst area. Earth Environ, 38: 31–35
Deng Y, Han Z, Yu W, et al. 2025. Integrating karst bare rock index (KBRI) into the CASA model to improve grassland aboveground biomass estimation in karst area, Southwest China. Ecol Model, 501: 111001
D'Ettorre U S, Liso I S, Parise M. 2024. Desertification in karst areas: A review. Earth-Sci Rev, 253: 104786
Du E Z, Terrer C, Pellegrini A F A, et al. 2020. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation. Nat Geosci, 13: 221–226
Du Y, Pan G, Li L, et al. 2011. Leaf N/P ratio and nutrient reuse between dominant species and stands: Predicting phosphorus deficiencies in karst ecosystems, Southwestern China. Environ Earth Sci, 64: 299–309
Fang F, Zi R, Han Z, et al. 2025. Estimation of soil thickness in karst landforms using a quantile regression forests approach. Geoderma, 460: 117416
Fick S E, Hijmans R J. 2017. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. Int J Climatol, 37: 4302–4315
Fruchterman T M J, Reingold E M. 1991. Graph drawing by force-directed placement. Softw Pract Exp, 21: 1129–1164
Gao P, Liu Y, Wang Y, et al. 2019. Spatial and temporal changes of P and Ca distribution and fractionation in soil and sediment in a karst farmland-wetland system. Chemosphere, 220: 644–650
Geekiyanage N, Goodale U M, Cao K, et al. 2019. Plant ecology of tropical and subtropical karst ecosystems. Biotropica, 51: 626–640
Greiser C, Hederová L, Vico G, et al. 2024. Higher soil moisture increases microclimate temperature buffering in temperate broadleaf forests. Agric For Meteor, 345: 109828
He Y, Wang L, Pei J, et al. 2025. Differential vegetation drought adaptability in global karst areas. npj Clim Atmos Sci, 8: 343
Hou F, Cheng J, Zhang H, et al. 2024. Response of preferential flow to soil-root-rock fragment system in karst rocky desertification areas. Ecol Indic, 165: 112234
Hu K, Chen H, Nie Y, et al. 2015. Seasonal recharge and mean residence times of soil and epikarst water in a small karst catchment of Southwest China. Sci Rep, 5: 10215
Jiang W, Peng T, Zhang X, et al. 2025. High-resolution electrical resistivity tomography for quantitative interpretation of sub-surface karst structures: A case study in Southwest China. Geoderma, 461: 117460
Jiang Z H, Liu H Y, Wang H Y, et al. 2020. Bedrock geochemistry influences vegetation growth by regulating the regolith water holding capacity. Nat Commun, 11: 2392
Jing J, Li R, Xiong L, et al. 2025. Binary response of runoff generation and erosion processes to karst vegetation-soil-rock structure and its hydrodynamic mechanisms. J Hydrol, 647: 132319
Lang N, Jetz W, Schindler K, et al. 2023. A high-resolution canopy height model of the Earth. Nat Ecol Evol, 7: 1778–1789
Li J, Chen S, Long X, et al. 2025. Linking rock outcrop size and distance to soil multifunctionality in mountain ecosystems. Funct Ecol, 39: 1288–1301
Li Y, Luo X, Li J. 2022. Habitat heterogeneity in karst environments influences the proportion and distribution of random framework. Ecol Indic, 143: 109387
Liu C C, Liu Y G, Guo K, et al. 2014. Concentrations and resorption patterns of 13 nutrients in different plant functional types in the karst region of South-western China. Ann Bot, 113: 873–885
Liu H Y, Dai J Y, Xu C Y, et al. 2021. Bedrock-associated belowground and aboveground interactions and their implications for vegetation restoration in the karst critical zone of subtropical Southwest China. Prog Phys Geog-Earth Environ, 45: 7–19
Liu W, Chen H, Zou Q, et al. 2021. Divergent root water uptake depth and coordinated hydraulic traits among typical karst plantations of subtropical China: Implication for plant water adaptation under precipitation changes. Agric Water Manage, 249: 106798
Liu W, Nie Y, Luo Z, et al. 2023. Transpiration rates decline under limited moisture supply along hillslopes in a humid karst terrain. Sci Total Environ, 894: 164977

Liu Y, Liu C, Rubinato M, et al. 2020. An assessment of soil's nutrient deficiencies and their influence on the restoration of degraded karst vegetation in Southwest China. Forests, 11: 797
Patton N R, Lohse K A, Godsey S E, et al. 2018. Predicting soil thickness on soil mantled hillslopes. Nat Commun, 9: 3329
Pons P, Latapy M. 2005. Computing communities in large networks using random walks. In: Proceedings of the 20th International Symposium on Computer and Information Sciences. Istanbul. 284–293
Stocker B D, Tumber-Dávila S J, Konings A G, et al. 2023. Global patterns of water storage in the rooting zones of vegetation. Nat Geosci, 16: 250–256
Sun M, Yang R, Tang Y, et al. 2023. Lithologic control of soil C:N:P stoichiometry across a climatic gradient in Southwest China. J Soil Sediment, 23: 1662–1673
Sun Y, Zhang S, Liang Y, et al. 2025. Plants drive microbial biomass and composition but not diversity to promote ecosystem multifunctionality in karst vegetation restoration. Microorganisms, 13: 590
Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. 2020. Forest management in Southern China generates short term extensive carbon sequestration. Nat Commun, 11: 129
Wan C Y, Yu J R, Li Z G, et al. 2025. Contrasting leaf nutrient-hydraulic relationships between karst and non-karst forests. Plant Soil, 513: 775–787
Wang F, Zhang J, Lian J, et al. 2022. Spatial variability of epikarst thickness and its controlling factors in a dolomite catchment. Geoderma, 428: 116213
Wei H, Deng Y, Lin L, et al. 2023. Improved soil composition promotes nutrient recovery during vegetation restoration in karst peak-cluster depressions. Catena, 222: 106769
Wieder W R, Cleveland C C, Smith W K, et al. 2015. Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability. Nat Geosci, 8: 441–444
Wu P, Zhou H, Cui Y, et al. 2022. Stoichiometric characteristics of leaf, litter and soil during vegetation succession in Maolan National Nature Reserve, Guizhou, China. Sustainability, 14: 16517
Xiao D, Chen M, He X, et al. 2023. Soil nutrients and vegetation along a karst slope gradient affect arbuscular mycorrhizal fungi colonization of roots rather than bulk soil AMF diversity. Plant Soil, 489: 139–154
Xiao D, Tang Y, Zhang W, et al. 2024. Lithology and niche habitat have significant effect on arbuscular mycorrhizal fungal abundance and their interspecific interactions. Sci Total Environ, 919: 170774
Xu H, Yue C, Zhang Y, et al. 2023. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China. Proc Natl Acad Sci USA, 120: e2304988120
Yue Y, Wang L, Zhang X, et al. 2024. Towards achieving carbon neutrality: The role of vegetation restoration in karst regions of Southwest China. J Earth Sci, 35: 1044–1048
Zhang J, Wang S, Fu Z, et al. 2022. Soil thickness controls the rainfall-runoff relationship at the karst hillslope critical zone in southwest China. J Hydrol, 609: 127779
Zhang L, Du H, Yang Z, et al. 2022. Topography and soil properties determine biomass and productivity indirectly via community structural and species diversity in karst forest, Southwest China. Sustainability, 14: 7644
Zhang M, He H, Zhang L, et al. 2025. Ecosystem engineering and global changes are increasingly enhancing China's terrestrial carbon sinks. Resour Conserv Recy, 223: 108514
Zhang S, Bai X, Zhao C, et al. 2022. Limitations of soil moisture and formation rate on vegetation growth in karst areas. Sci Total Environ, 810: 151209
Zhang W, Zhao J, Pan F, et al. 2015. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in Southwest China. Plant Soil, 391: 77–91
Zhang X, Yue Y, Shi L, et al. 2025. A preliminary study on estimating soil thickness on karst dolomite slopes using ground gamma radiation dose rate in Southwest China. Catena, 260: 109472
Zhang X M, Brandt M, Yue Y M, et al. 2022. The carbon sink potential of Southern China after two decades of afforestation. Earths Future, 10: e2022EF002674
Zhao Q, Zhu Z, Zeng H, et al. 2022. Seasonal peak photosynthesis is hindered by late canopy development in northern ecosystems. Nat Plants, 8: 1484–1492
Zhong F, Xu X, Li Z, et al. 2022. Relationships between lithology, topography, soil, and vegetation, and their implications for karst vegetation restoration. Catena, 209: 105831
Zhu X, Liu H, He W, et al. 2023. Regolith water storage patterns determine vegetation productivity in global karst regions. Geoderma, 430: 116292
Zhu X R, Liu H Y, Wu L, et al. 2021. Impact of bedrock geochemistry on vegetation productivity depends on climate dryness in the Guizhou karst of China. Prog Phys Geog-Earth Environ, 45: 20–32

（责任编委：张甘霖）