

中国喀斯特生态系统健康诊断的方法、进展与展望

白晓永^{1,2,3}, 冉晨^{1,7}, 陈敬安^{1,2}, 罗光杰³, 陈飞⁴, 肖碧琴⁵, 龙明康^{1,7}, 李姿霖⁵, 张小芸⁵, 沈晓倩⁵, 杨姝⁵, 林心海⁶, 李朝君^{1,7}, 张思蕊^{1,7}, 熊练⁵, 王世杰^{1,2*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061;

3. 贵州师范学院贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵阳 550018;

4. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025;

5. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025;

6. 贵州大学林学院, 贵阳 550025;

7. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

2022-11-14 收稿, 2023-02-07 修回, 2023-02-08 接受, 2023-03-21 网络版发表

国家自然科学基金联合基金(U22A20619)、中国科学院“西部之光”交叉团队项目(xbzb-gzsys-202101)、国家自然科学基金(42077455, 42167032)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB40000000, XDA23060100)、贵州省省级科技计划(黔科合支撑[2022]198)、贵州省高层次人才遴选培养计划(黔科合平台人才-GCC[2022]015-1, 黔科合平台人才[2016]5648)、2020年贵州省补助资金(GZ2020SIG)、环境地球化学国家重点实验室开放基金(SKLEG2022206, SKLEG2022208)和中央引导地方科技发展专项资金(黔科中引地[2021]4028)资助

摘要 中国是碳酸盐岩型喀斯特面积最大、分布最广的国家,在喀斯特地区居住着约2亿的人口,经济规模约占全国的10%。尤其是以贵州为中心的西南地区,位于长江和珠江的上游,经济欠发达,但却是国家的重要生态安全屏障。喀斯特地貌重要而特殊,科学诊断其生态系统的健康不仅对生态修复和实现可持续发展至关重要,更是制定应对方案的基本前提。尽管以往开展了大量的研究工作,但是依然缺乏系统性和整体性认识。本文结合前人研究,进一步将喀斯特地貌演化发育总结为6个阶段:成岩阶段、成陆阶段、成山阶段、成丛阶段、成林阶段和成原阶段。在此基础上,又从碳酸盐岩风化速率的计算、土壤水的诊断、水土流失的评价、石漠化解译与演变、生态系统服务的科学计量5个方面进行系统的总结和梳理。尽管不同时代、不同学者的不同研究方法,其结果有着非常大的差异。但是,综合考虑已有的研究结果及其使用方法的优点和不足,归纳发现:(1)碳酸盐岩化学风化很快($30\sim 130\text{ mm ka}^{-1}$),但由于其酸不溶物含量低(5%以内),导致其成土速率极其缓慢,一般在 $5\sim 50\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间。(2)土壤少且分布不连续,但是土壤含水量却比较高,在 $0.2\sim 0.4\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 之间,这可能与周边基岩的汇水效应相关,且未来呈干化趋势。(3)土壤侵蚀模数低,一般在 $2\sim 200\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间,但由于坡陡、降雨量大且与岩土突变接触,导致其侵蚀风险极大,并存在一定比例的地下漏失现象。(4)石漠化的演变可分为单变式、渐进式和返变式3种经典类型,但是通过决策树和人机交互的石漠化解译方法相对高效和精准。(5)喀斯特生态系统服务功能的评价模型要基于成土速率来进行修正水土保持功能和基于岩溶地质碳汇修正气候调节功能。当前诊断喀斯特生态系统健康的指标、方法和模型亟须改进和创新,要充分体现喀斯特地区的特殊性和模型方法的匹配性,提高监测数据的时空分辨率,特别是亟须建立喀斯特社会-生态系统耦合模型,准确刻画出喀斯特生态系统对气候变化和人类活动的响应过程,提升诊断模型的准确性和可预测性。总之,本文系统总结了诊断中国喀斯特生态系统健康与可持续性的方法和取得的重大进展,并进一步从“岩-土-水-石-生”的角度提出了未来的研究方向和突破重点,以期为维护喀斯特地区的生态安全和可持续发展提供科技支撑。

关键词 喀斯特, 生态系统健康, 碳酸盐岩, 风化速率, 石漠化

引用格式: 白晓永, 冉晨, 陈敬安, 等. 中国喀斯特生态系统健康诊断的方法、进展与展望. 科学通报, 2023, 68: 2550-2568

Bai X Y, Ran C, Chen J A, et al. Methods, progress and prospect for diagnosis of karst ecosystem health in China—An overview (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 2550-2568, doi: 10.1360/TB-2022-1174

喀斯特是全球主要地貌类型之一, 约占陆地面积的15%^[1]. 中国是喀斯特面积最大、分布最广的国家^[2], 达344万平方千米(裸露型、覆盖型和埋藏型), 约占国土陆地面积的1/3^[3]. 其中, 裸露型约为152万平方千米, 占国土面积的15.83%. 特别是以贵州为中心的西南裸露型喀斯特地区是世界上面积最大、最集中连片分布区(图1(a)), 位于长江和珠江流域的上游, 是国家重要的生态安全屏障(图1(b)). 中国喀斯特区域总人口约为19949.37万人, 占比总人口(14亿人)的14.25%(图1(c)). 截至2020年, 喀斯特地区的国内生产总值约为98598.32亿元(图1(d)), 占全国国内生产总值的9.87%.

喀斯特(karst)原本只是地名, 位于南斯拉夫西北部(Istarska)半岛石灰岩高原^[1], 距克罗地亚被称为“地球

之眼”的蓝绿色喀斯特泉不远处. 当地称kars, 意大利语为carso, 德语称karst. 它来自印欧语“kar”, 即岩石裸露的地方^[3]. 可概述为水对三大可溶性岩石(碳酸盐岩类、硫酸盐岩、卤盐岩)所进行的溶蚀作用以及由此形成的景观、现象和过程^[4]. 1966年, 在我国第二次岩溶学术会议(广西桂林召开)上, 学者对“喀斯特”这个名词进行了反复的讨论研究, 绝大多数学者认为, 把“喀斯特”改为“岩溶”较为适合, 因为“岩溶”就是岩石化学溶解的意思, 比较容易理解和接受. 因此, 会议建议, 在有关科技文献中统一使用这一术语, 但鉴于开始阶段, 大家还不够熟悉, 书写时暂用“岩溶(喀斯特)”形式代替, 以便逐步推广统一. 1981年, 在山西太原召开的北方岩溶会议上, 为了方便与国际接轨和学术交流, 学

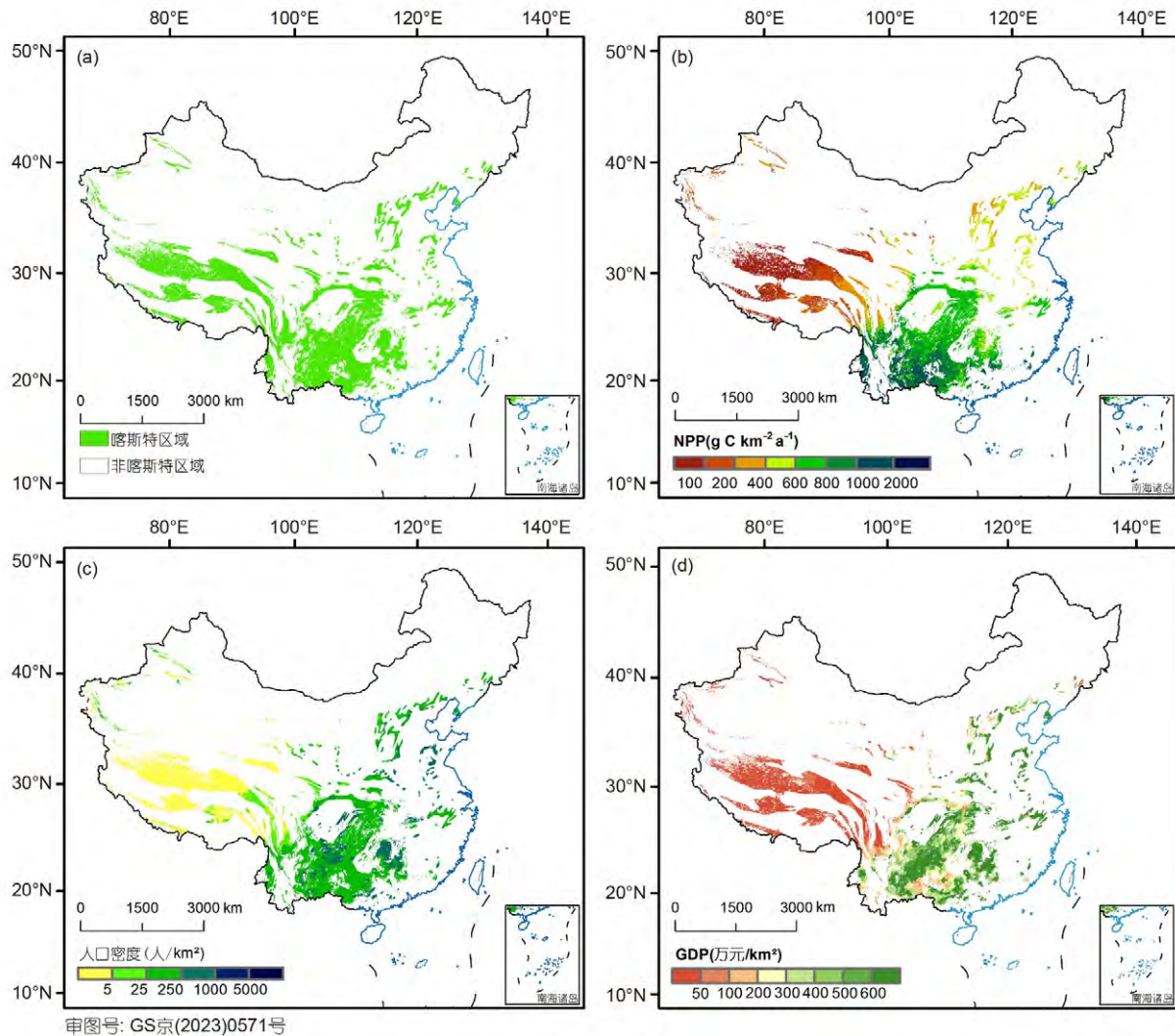


图1 中国喀斯特地区喀斯特(a)、NPP(b)、人口密度(c)及GDP(d)的空间格局

Figure 1 Spatial patterns of karst (a), NPP (b), population density (c) and GDP (d) in karst regions of China

界界定“喀斯特”和“岩溶”二者皆可使用。但是，东北黑土地的“黑土岩溶”、黄土高原的“黄土岩溶”和青藏高原的“冻土岩溶”被认为是“假岩溶”，主要判别依据是它们的物质基础不属于三大可溶性岩石的任何类别。

喀斯特形态的形成与演化不是静止孤立的，而是随着时间和空间的运动而变化，我国学者提出了不同的喀斯特发育理论。任美镠和刘振中^[4]指出，喀斯特地貌的发育即从一个原始、规则的构造面或一个上升的微起伏剥蚀面开始发育，之后经历了3个时期。(1) 青年期：漏斗、落水洞、洼地发育，地表水几乎全部转化为地下水，主河仍可存在；(2) 中年期：由于地下河顶板的塌落，地下河向地表河转化，大量溶蚀洼地和谷地发育；(3) 老年期：由于不透水层广泛出露，或地面高度接近侵蚀基准面，此时，地表演化成泛滥平原，平原上分布了孤峰、残丘，喀斯特现象逐渐消失。受地质构造运动的影响，也可能存在幼年期、青年期、中年期喀斯特地貌同时并存的现象。中国科学院《中国自然地理》编辑委员会^[5]将喀斯特地貌的发育顺序分为：峰丛→峰林→孤峰→残丘。Song^[6]指出，贵州南部喀斯特地貌经历了4个阶段，分别是：漏斗-洼地阶段、峰丛洼

地阶段、峰林盆地阶段，以及由于地壳上升、排泄基准面下降引起的回春峰丛-洼地或峡谷阶段。卢耀如^[7]将中国喀斯特地区地貌发育演化归纳为8种模式，分别为：强烈上升、连续隆起、由于不同的上升隆起速率引起的差异隆起、缓慢隆起、广阔沉降、狭窄沉降、剥蚀裸露和由于海岸带沉降及海水入侵使喀斯特地貌演化与发育由陆地转变为海洋环境的海洋演化模式。这些演化模式密切关联，共同受到全球性地质构造与气候条件的总体变化规律所控制。

我们结合前人的研究，进一步将喀斯特地貌演化发育概括为6个阶段(图2)。(1) 成岩阶段，海洋环境中重碳酸钙过饱和沉淀而形成碳酸盐岩。(2) 成陆阶段，地壳运动使得碳酸盐岩被抬升到海面以上，形成陆表主体岩层。(3) 成山阶段，构造运动横向的挤压力和纵向的拉伸力使得喀斯特大陆形成高大山峰和深邃山谷，同时产生更多裂隙和管道，加大了岩溶作用的进行。(4) 成丛阶段，长期溶蚀，地下系统发育，加上外力侵蚀作用，伴随构造抬升的露尖作用，形成峰丛，峰丛洼地是一种具有复杂双重结构的喀斯特地貌形态^[8]。(5) 成林阶段，随着溶蚀作用和侵蚀作用不断进行，伴随着坍塌，峰丛的连接山脊线不断被打断、被隔离，峰丛被溶蚀侵蚀成为峰林

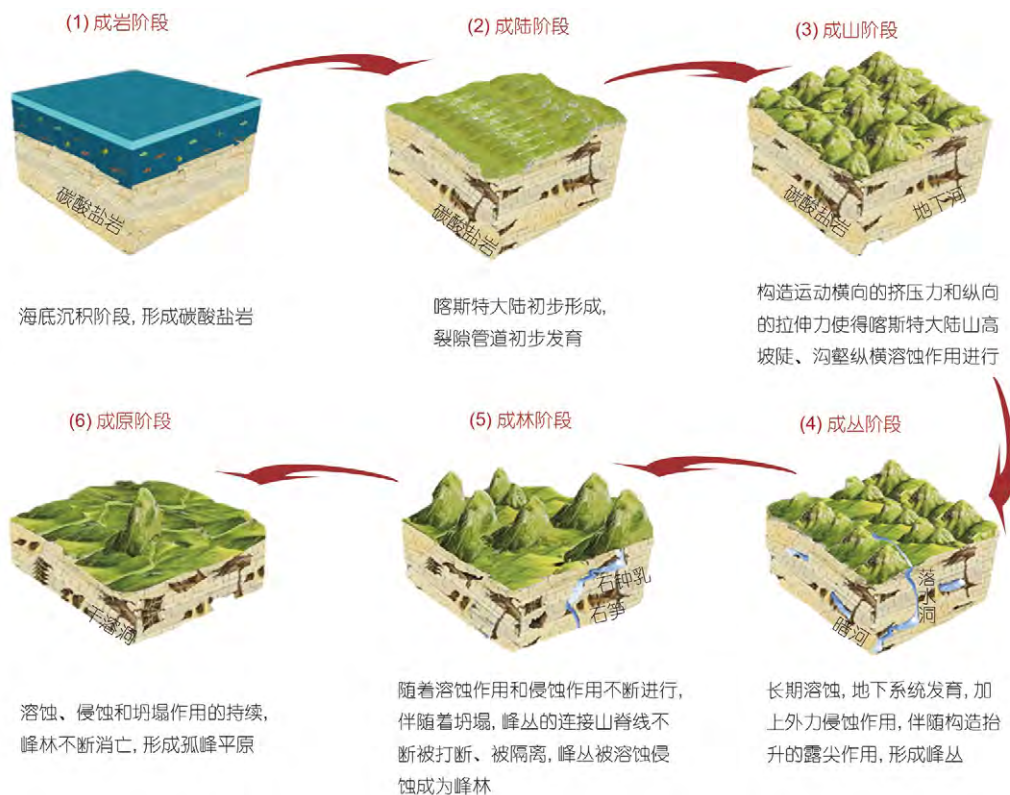


图2 喀斯特地貌形成的地质历史过程示意图
Figure 2 Schematic diagram of geologic historical processes in the formation of karst landforms

峰丛的连接山脊线不断被打断、被隔离,峰丛被溶蚀侵蚀成为峰林^[9]。(6)成原阶段,溶蚀、侵蚀和坍塌作用的持续,峰林不断消亡,形成孤峰平原,孤峰是喀斯特地貌发育到晚期的结果^[10]。

在成陆阶段后,尤其是近一个世纪以来,人类活动加剧,塑造了大量的人造地貌,并对生态系统造成了严重干扰和破坏。尽管河-湖沉积相存在,但土层的物质主要来源于下伏碳酸盐岩的风化产物^[11],碳酸盐岩风化产物或地表原有风化壳物质进入岩溶裂隙或落水洞,从根本上制约了土壤物质的积累,导致喀斯特地区成土慢、土层薄、土壤水少等,导致植被退化演替^[12]。人类干扰和破坏,加剧了土壤侵蚀、导致喀斯特生态系统的退化现象严重,生物多样性降低^[13]、生态系统服务下降^[14],产生了威胁人类生产和生活的土地石漠化问题。

喀斯特生态系统与其他生态系统相比,具有其独特的特殊性(图3)。喀斯特地区成土速率极慢,风化极快,钙镁变成离子态,进入水体、河流,最后流入海洋,很难在地表形成土壤,加之地表渗漏严重,土壤水空间分布异质性强,不仅影响气候、陆地碳循环等,还作用于土壤微生物呼吸^[15]、植物生产,即植物固碳^[16]等生物作用。由于成土速率和土壤水的异质性、气候和人

为作用,以及山高坡陡且分散^[17]、人地矛盾尖锐,致使喀斯特地区水土流失和地下漏失严重,造成石漠化,使喀斯特生态系统受到严重的环境威胁。可溶性碳酸盐岩(如石灰岩、白云岩等)的喀斯特石漠化和非可溶性岩(如花岗岩、玄武岩等)的花岗岩石漠化^[18]在成土机制和成土作用上存在明显的区别。与沙漠化的区别是,沙漠化发生在干旱、半干旱区,水少^[19],而石漠化发生在湿润地区,土少。无论是石漠化,还是沙漠化,虽然都受到自然气候变化的影响,即使影响程度不同,但只要是人类活动破坏造成的,便可通过治理使其景观格局发生变化^[20]。尽管喀斯特地区成土慢、土壤水少、水土流失严重、石漠化范围广,但其植被与岩石固碳以及释氧等生态系统服务对喀斯特地区生物多样性、水源涵养、水土保持、石漠化治理等至关重要^[21]。

尽管,目前的研究已经取得了很大成就,但不同研究对喀斯特生态系统成土速率、土壤水变化、水土流失、石漠化过程、生态系统服务等估算结果依然存在较大的分歧与争议。因此,本文从喀斯特生态系统的成土速率计算、土壤水诊断、水土流失评价、石漠化解译、生态系统服务模型5个方面,分别阐述了其重要性、特殊性、国内外研究现状,以及系统梳理和总结凝练了各自方法的优缺点,厘清不同研究结果分歧背



图3 喀斯特生态地质系统概念模型示意图

Figure 3 Schematic diagram of conceptual model of karst eco-geological system

后的原因和脉络, 并进行思考和对未来的展望, 以期抛砖引玉, 为更准确诊断中国喀斯特生态系统的健康和可持续性提供研究思路和方法论参考。

1 碳酸盐岩化学风化成土速率计算

1.1 喀斯特风化成土的机制和特点

碳酸盐岩化学风化成土速率是制约喀斯特生态系统的关键因子, 喀斯特成土学说主要可以归结为“溶蚀-残积说”“溶蚀-交代成因说”和“外来沉积说”3种^[22-24]。但是, 溶蚀-残积说(碳酸盐岩化学风化)可能是喀斯特地区土壤形成的真正机制^[25], 由于碳酸盐岩风化快, 但酸不溶物含量低, 导致其风化成土速率极为缓慢而水土流失快^[26], 使得喀斯特生态系统十分脆弱, 土壤侵蚀和石漠化问题非常突出, 制约了区域的可持续发展。

尽管喀斯特地区碳酸盐岩风化快, 其风化成土速率大小取决于溶蚀速率及酸不溶物含量^[27], 但是由于多数碳酸盐岩酸不溶物含量不足10%, 纯石灰岩或白云岩甚至低于1%, 导致喀斯特地区成土过程十分缓慢, 纯碳酸盐岩风化形成1 m厚的土层需要250~7880 ka, 成土时间是非喀斯特区的10~40倍^[28]。碳酸盐岩风化后很多变成离子态(HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}), 进入河流、水体, 流入海洋, 很难在地表形成土壤。

此外, 白云岩的差异性风化明显弱于石灰岩, 白云岩形成的节理及裂隙密集而均匀, 近地表含水能力强, 风化作用相对集中于地表或近地表, 有利于岩石整体风化作用的进行, 风化残积形成的土壤分布也相对均匀。灰岩由于不均匀的构造裂隙和破碎带的发育, 加上其相对较快的溶蚀速率, 形成显著的差异性风化, 无论是风化作用, 还是残余土壤物质的堆积, 均表现出强烈的不均匀性。石灰岩由于溶蚀强, 表层岩溶带

的厚度较大; 白云岩溶蚀强度均匀发展, 表层岩溶带厚度较小^[22]。

1.2 取得的重要性进展和突破性成果

我们从方法、计算结果以及岩石类型3个方面对国内外成土速率的相关研究进行了系统梳理。首先, 在方法方面, 以往研究主要以化学实验、实际观测和理论计算三大类方法对成土速率进行了估算(表1)。(1) 化学实验类方法主要以室内溶蚀实验、标准溶蚀试片法为主, 多是基于单个剖面或者多个剖面统计的碳酸盐岩溶蚀速率和不溶物含量来推算^[3,29,30]。此类方法概念简单、易于测定。(2) 在实际观测类方法中, 多数学者选择流域元素平衡算法^[31], 该算法假定流域处于稳定状态, 利用地球化学质量平衡对流域短期成土速率进行计算。剖面质量平衡法^[32]与前者相反, 主要计算历史长期的成土风化速率, 必须基于已知的土壤剖面的风化年龄才能使结果较为准确。模拟淋溶实验^[33]侧重于土柱的风化机理研究。(3) 在理论计算类方法中, 以模型法为主, 包括剖面土壤酸化模型(PROFILE model)^[34]、流域土壤酸化模型(MAGIC model)^[35]等, 使用以上模型时, 土壤物质组成保持不变, 模型参数均用平均值, 主要用于计算剖面及流域当前的风化速率。

其次, 在成土速率计算方面, 学者在各地开展了研究。Morgan^[36]认为, 母岩的平均风化成土速率大约为 $100 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 依据气候及其他因素的差异, 变化范围在 $10\sim 300 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间。美国芝加哥大学地质系主任Chamberlin^[37]认为, 自冰川时期以来, 土壤形成的平均速率至少为 $1 \text{ cm}/330 \text{ a}$ 。总的来说, 在中国喀斯特地区, 根据不同学者的研究结果(图4)可知, 形成1 cm土壤需要时间为0.1~7.38万年。韦启璠等人^[29]认为, 形成1 cm的石灰土需要1.3~3.2万年, 与南斯拉夫石灰土发育的速率(形成1 cm的土层需要2万年)相近。袁道先^[3]估算,

表1 碳酸盐岩化学风化成土速率计算方法的比较

Table 1 Comparison of calculation methods for chemical weathering of carbonate rocks soil formation rate

方法	原理	适用范围和尺度	参考文献
室内溶蚀实验标准溶蚀试片	基于统计的碳酸盐岩溶蚀速率和不溶物含量来推算	单个剖面或多个剖面	[3,29,30]
流域元素平衡算法	利用地球化学质量平衡进行计算	流域短期的成土速率	[31]
剖面质量平衡法	基于土壤剖面的风化年龄推算	历史长期的成土风化速率	[32]
模拟淋溶实验	用一定酸度去离子水模拟淋溶土柱	侧重于土柱的风化机理	[33]
剖面土壤酸化模型	迁移状态理论和动力学速率法则	当前剖面风化速率	[34]
流域土壤酸化模型	流域盐基收支平衡	当前流域风化速率	[35]

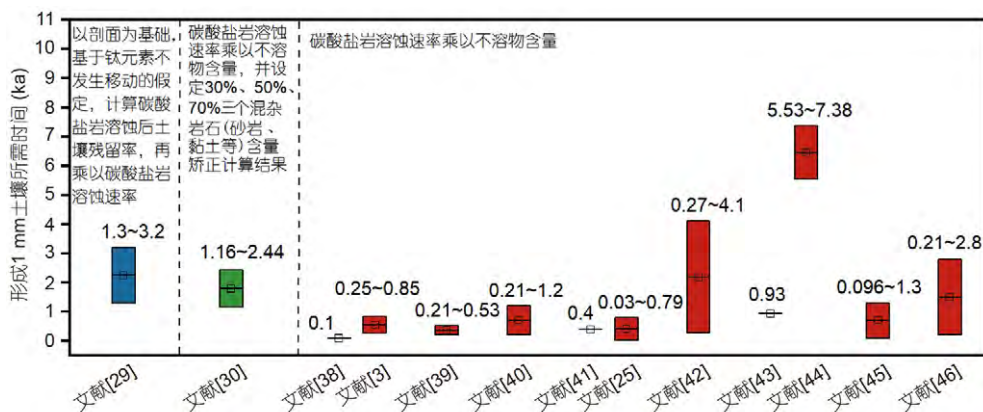


图4 不同研究对碳酸盐岩化学风化土速率的计算结果对比

Figure 4 Comparison of calculation results of chemical weathering of carbonate rocks soil formation rate by different studies

碳酸盐岩成土1 cm需要的时间为0.25~0.85万年。柴宗新^[30]根据碳酸盐岩溶蚀速率、成土过程特点和喀斯特区岩石组成比例,确定了广西喀斯特区成土速率约为68~143 t km⁻² a⁻¹(约1.16~2.44万年)。学者根据碳酸盐岩溶蚀速率及酸不溶物含量推算了碳酸盐岩风化形成1 mm土层所需要的时间^[38-46],其结果各不相同。

此外,岩石内部由于矿物结构以及组成成分存在差异性,而使得其在类似的外部环境影响下呈现出不同的风化速率和成土速率。例如,花岗岩主要组成成分为石英、长石和云母,材质非常坚硬,极不易风化。研究表明,在同一亚热带气候条件下,花岗岩的平均风化速率为69.6 t km⁻² a⁻¹(58 mm ka⁻¹),土壤平均形成速率为59.8 t km⁻² a⁻¹(49 mm ka⁻¹),至少需要2年以上才能形成1 m厚的土壤^[47]。气候(温度和降雨/径流)是影响风化速率非常重要的一个因素^[48],当年均温与降雨量较大时,风化速率通常较大。例如,美国东北部Hubbard Brook流域的风化速率小于属于亚热带花岗岩地区的流域。主要是因为Hubbard Brook流域位于温带,年均温只有5°C,年均降雨量也只有1295 mm^[49],而位于亚热带花岗岩地区的流域年均温度为16.5°C,降雨量也较Hubbard Brook流域高。而碳酸盐岩主要组成成分为白云岩和石灰岩,研究发现,以白云岩分布为主的舞阳河流域化学风化速率(62 mm ka⁻¹)大于以石灰岩为主的乌江流域(49 mm ka⁻¹)^[22,50]。碳酸盐岩地区风化速率与岩性、植被覆盖等息息相关,中国喀斯特地区碳酸盐岩风化成土速率仅为5.46 t km⁻² a⁻¹(4.37 mm ka⁻¹)^[46]。尽管喀斯特地区碳酸盐岩化学风化快,但是由于酸不溶物含量低,导致成土母质不够,使得成土速率极其缓

慢,加上降雨量大而降雨侵蚀剧烈,导致喀斯特地区缺土问题非常严重。综上,无论是花岗岩,还是碳酸盐岩,即使是同一种岩石,它们的风化和成土速率因受到气候条件的影响而表现出显著的差异。

2 喀斯特土壤水诊断

2.1 喀斯特生态系统土壤水重要性和特殊性

喀斯特土壤水的多少关系到植被生产力及农作物产量^[16]。同时,影响陆地碳的吸收与分解,以及岩石物质与元素的运移^[51],对维持环境、粮食安全具有重要意义^[52]。但是,喀斯特土壤水有其特殊性。首先,喀斯特生态系统抵抗外界干扰能力差^[53],土壤少,土壤水有效库容较低^[54];其次,自然降雨充足,使得土壤水含量高;最后,地表水渗漏严重,土壤水空间异质性强。

2.2 取得的重要性进展和突破性成果

监测土壤水分的方法很多,主要有质量法^[55]、传感器测量法^[56]、热惯量法^[57]、特征空间指数法^[58]、微波遥感法^[59]、介电法^[60]、遥感技术法^[61]、实地采样法^[62],但每个方法都有各自的优缺点(表2)。当然,在喀斯特地区较为适用的方法是实地采样法、质量法和微波遥感法。

学者采用实地采样法对喀斯特地区的土壤水分进行研究,对于桂西北喀斯特,土层越深,土壤水含量越高,且受土地利用方式的影响较大^[63],降水、土壤质地和地形^[64]是造成土壤水差异的主要原因。西南喀斯特地区土壤容重、孔隙度及有机质会影响土壤水含

表2 不同喀斯特土壤水监测方法优缺点的比较

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of different monitoring methods for karst soil moisture

方法	优点	缺陷	参考文献
质量法	得出精确的土壤水分百分比	消耗大量的时间和人力	[55]
传感器测量法	节省大量的时间和劳力	不能推广到大区域上	[56]
热惯量法	多用于裸地与低植被覆盖区	应用较为困难	[57]
特征空间指数法	应用广泛	回归相关系数不高, 可信度差	[58]
微波遥感法	发展时间较长、数据量丰富	消除其他因素对反演土壤水分的影响难	[59]
介电法	可以连续监测土壤水	对传感器参数率定的方法各有异同	[60]
遥感技术法	监测范围广, 速度快, 成本低	发展时间短, 需要与野外作业相结合	[61]
实地采样法	较准确测出土壤水分的含量	推广到大区域上较为困难	[62]

量^[65]。刘海隆等人^[66]采用质量法研究表明, 喀斯特山区土壤含水量随坡度增大而减小。此外, 还有学者采用微波遥感法进行研究, 发现植树造林会增加陆面蒸散发, 从而降低土壤水分和地表径流量^[67]。中国喀斯特地区气候、植被和地质背景使土壤水分时空分布存在差异^[68]; 喀斯特地区植被覆盖度和土壤物理性质的差异是表层土壤水分动态差异的主要原因^[69]。土壤水分的监测方法为其研究提供了技术支撑, 更好地为喀斯特地区的生态恢复和水土保持提供科学依据。

3 喀斯特地区的水土流失评价

3.1 喀斯特地区水土流失的严重性和特殊性

土壤侵蚀是影响全球生态环境和人类发展最严重的环境问题之一^[70], 喀斯特地区是土壤流失敏感区域, 尽管该区域侵蚀模数小, 但是侵蚀风险极大。土壤侵蚀制约着当地区域经济发展和生态安全, 日益严重的土壤侵蚀对区域可持续发展以及生态安全格局造成巨大的威胁。

但是, 喀斯特地区由于其独特的地表地下二维结构, 使土壤侵蚀存在地表流失和地下漏失两种方式^[71], 喀斯特地区山高坡陡, 贵州省地块平均坡度达21.72°^[72], 该地区成土速率较低, 实际土壤保有量较低, 土层浅薄且不连续分布的特征再加上人地矛盾尖锐, 使得植被破坏和土地退化严重, 喀斯特土壤侵蚀主要发生在25°以上的坡耕地^[73], 土壤侵蚀的发生会造成石漠化进程加快, 喀斯特生态环境严重恶化。

3.2 取得的重要性进展和突破性成果

以往的水土流失监测方法研究采用了模型法、径

流小区法、人工模拟降雨实验、坡耕地模拟、修建沉沙池等实验方法以及示踪技术等, 研究了喀斯特土壤侵蚀规律及其空间分布, 对土壤侵蚀影响因子进行了定量评价, 取得了一些成果。但是, 目前土壤侵蚀评价标准并不适用以及并没有统一的问题依旧存在。另外, 尚未在岩溶区流域尺度上建立起较完整的水土流失监测体系, 坡面土壤侵蚀规律推广到流域, 甚至区域尺度还需要进一步研究, 基于降雨侵蚀力和成土速率的土壤侵蚀风险评价模型需要进一步地改进和优化。

国外对喀斯特地区土壤侵蚀的研究较少, 国内学者在水土流失监测方面利用不同的方法开展了大量研究工作。由于山高坡陡、土壤浅薄的特征, 关于西南喀斯特地区坡面侵蚀的研究众多。高儒学等人^[74]揭示坡长对喀斯特坡耕地土壤侵蚀的影响作用, 进一步证实了喀斯特坡长研究在水土流失治理中的关键作用。由于坡面土壤侵蚀以面蚀为主, 而小流域土壤侵蚀方式多样, 其研究将更为复杂。钱庆欢等人^[45]针对以往的传统算法不适用于喀斯特区特殊地形的问題, 制定了适用于喀斯特地区的土壤侵蚀分类分级标准和风险评价方法。王克林等人^[75]通过改进或校正算法提升了喀斯特地区土壤侵蚀模型模拟精度, 解决了普通模型不适用于喀斯特二元结构的问题。与地表水土流失相比, 喀斯特地区土壤漏失研究起步较晚。张信宝等人^[71]提出了在碳酸盐岩坡地土壤流失有地面流失和地下漏失两种方式, 揭示了地下漏失往往是主要的土壤流失方式。陈洪松等人^[76]系统总结了西南喀斯特地区土壤侵蚀特征的研究现状, 解决了西南地区土壤侵蚀问题不明确且对未来研究不清晰的问题。

关于土壤侵蚀模数的具体测算, 学者在各地开展了研究(表3)。彭建和杨明德^[77]采用埋桩、修建沉沙池

表3 喀斯特地区土壤侵蚀模数研究结果对比

Table 3 Comparison of soil erosion modulus research results in karst area

方法	研究时间(年)	研究区	土壤侵蚀模数($t\ km^{-2}\ a^{-1}$)	参考文献
径流小区法	2001~2003	贵州省修文县	225~5382	[79]
径流小区法	2001~2003	滇东南峰丛洼地	387.7	[81]
	1999		174.5	[84]
径流小区法	2000	花江大峡谷北岸	813.6	
	2001		396.8	
^{137}Cs 指纹示踪	2007	重庆喀斯特山区	190.3~3759.4	[78]
^{137}Cs 测试法	2009	茂兰峰丛洼地	40.95	[83]
^{137}Cs 断代法	2009	贵州普定峰丛洼地	20.27	[82]
打桩法	1999~2000	花江大峡谷	178.22	[77]
	2008		819.99	
RUSLE模型	2013	喀斯特高原山地	1166	[80]
	2018		70.14	

的方法对花江喀斯特峡谷的水土流失现状和特点进行了讨论。结果表明,打桩法的土壤侵蚀模数范围在 $178.22\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 之间,修建沉沙池的土壤侵蚀模数是 $6.55\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$,表明通过种草来减轻峡谷地区的土壤侵蚀是一条十分有效的途径。

张治伟等人^[78]在重庆南部南川区境内按不同侵蚀强度取 ^{137}Cs 样品,测得不同土地利用类型下的土壤侵蚀模数范围为 $190.3\sim 3759.4\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 。该研究揭示了岩溶坡地不同侵蚀类型土壤侵蚀强度及特征,对石漠化综合治理具有重要的指导与实践意义。吴士章等人^[79]对黔中喀斯特地区(久长镇)20°坡耕地(黄壤土)不同种植处理条件下的土壤侵蚀与养分流失进行为期3年的观测,利用流域小区法测得土壤侵蚀模数范围为 $225\sim 5382\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 。该研究揭示了不同植被覆盖及种植条件下土壤侵蚀的差异,为区域生态环境治理提供了一定的科学依据。王志杰等人^[80]运用RUSLE模型研究了2008、2013和2018年贵阳市土壤侵蚀状况,2008~2018年土壤侵蚀模数从 $819.99\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 减少到 $70.14\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 。该研究剖析了不同土壤侵蚀类型的空间相关性和演化规律,并解析了降雨和植被对土壤侵蚀变化的影响,为新时期喀斯特地区土壤侵蚀/石漠化综合治理提供了科学依据。陈晓平^[81]在云南文山的西畴西部峰丛地区测得的平均侵蚀模数为 $387.7\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$,探讨了喀斯特山区土壤侵蚀特征、侵蚀分级指标、类型与成因等问题,为典型侵蚀研究区的土壤侵蚀治理提供了实践范例。白晓永等人^[82]利

用 ^{137}Cs 断代法测定了贵州普定县马官镇冲头峰丛洼地的沉积速率,据此推算了冲头小流域20世纪60年代以来的土壤侵蚀模数为 $20.27\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 。何永彬等人^[83]同样利用 ^{137}Cs 方法测得茂兰峰丛洼地小流域平均土壤侵蚀模数为 $45.95\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 。龙明忠等人^[84]利用花江大峡谷北岸(贵州关岭县板贵乡)9个谷坊对流失的推移质部分进行了拦截测量,得到1999、2000和2001年土壤侵蚀模数分别为 174.5 、 813.6 和 $396.8\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 。以往,学者对喀斯特区土壤侵蚀模数的具体测算,量化了喀斯特土壤侵蚀程度,并且阐明了其土壤侵蚀变化过程及其特点,为石漠化治理以及水土保持提供了科学依据。但是土壤侵蚀模数结果差距较大,原因在于使用的评价标准以及测量方法不一样,这是今后研究中需要进一步优化的问题。

4 喀斯特石漠化解译

4.1 喀斯特石漠化的重要性和特殊性

喀斯特石漠化是在亚热带脆弱喀斯特环境背景下,不合理的人类活动造成土壤严重侵蚀、土地生产力下降、地表呈现出类似荒漠化景观的土地退化过程^[85]。其本质是,喀斯特地区碳酸盐岩土壤形成速率低与水土流失率快,从而形成一个脆弱且易被干扰的环境,同时还容易受到植被覆盖森林砍伐和土地利用的影响,呈现出石头多、土壤少的情景^[86]。但是,喀斯特石漠化是喀斯特地区独有的一种土地退化形式,区别于花岗

岩石漠化和沙漠化(表4).

喀斯特石漠化的特征主要表现在以下几个方面. (1) 在区域上, 主要发生在温暖湿润气候条件下生态地质环境脆弱的喀斯特地区^[87]; (2) 在驱动力上, 以人类活动干扰为主要影响因素^[88]; (3) 在功能上, 石漠化地区岩石裂隙系统中仍有少量结构好、养分高的土壤留存, 仍具备一定的生产能力^[89]; (4) 在演化上, 存在一个多变性(异变性), 呈现出“先恶化再好转”的趋势^[90]. 根据其演变特征与规律, 我们将石漠化的时空演变方式变分为以下3种^[91]: (1) 单变方式. 是指由一种石漠化类型向另一种石漠化类型转变, 即“a→b”型, 反映了石漠化演变的“直接性”和“跳跃性”. (2) 连变方式. 一种石漠化类型首先转变为另一种石漠化类型, 即“a→b→c”型, 反映了石漠化演变的“等级性”. (3) 返变方式. 一种石漠化类型首先变化为另一种石漠化类型, 但最后又变回原类型, 即“a→b→a”型, 反映了石漠化演变的反复变化. 在此基础上, 我们又进一步将“单变方式”、“连变

方式”“返变方式”提炼为石漠化时空演变的“单变式”“渐变式”和“返变式”.

由于石漠化时空演变具有反复性和区域性, 为提高石漠化治理效果, 根据国务院批复的《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006–2015)》, 依据岩溶区的地质、地貌、水文、资源以及生态环境问题等条件, 将石漠化区域划分为: 中高山岩溶山地、岩溶断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷、峰丛洼地、岩溶槽谷、峰林平原、溶丘洼地(槽谷)(表5).

4.2 取得的重要性进展和突破性成果

通过对前人研究梳理发现, 石漠化解译方法主要分为实地调查和遥感解译两大类. 虽然实地调查法在小区域解译上精度高、目的性强, 不受时间和空间的限制, 但是其费时费力, 受研究区域限制. 所以目前大部分研究都是基于遥感方法, 尽管遥感解译具有时效性强、高时空分辨率及能进行大面积重复量化等优点,

表4 喀斯特石漠化、花岗岩石漠化与沙漠化的形成原因及主要特征的对比

Table 4 The comparison of the causes and main characteristics of karst rocky desertification, granite rocky desertification and desertification

类别	发生区域	形成原因	机理	特征		
				形成特征	分布特征	表现特征
喀斯特石漠化	碳酸盐岩地区, 代表省份有贵州、广西等	碳酸盐岩地质背景; 剧烈人类活动; 强降雨	碳酸盐岩风化不溶物含量低; 成土速率慢, 水土流失快; 土层浅薄; 生态系统恢复力稳定性低	以人类活动为主导因素	主要分布于中国西南地区坡度较大的坡面上	植被少, 土层薄, 岩石裸露率高
花岗岩石漠化	花岗岩地区, 代表省份有福建、广东等	花岗岩地质背景; 降雨强、平均气温高; 重力作用下花岗岩发生崩岗	以径流和重力作用作为侵蚀的营力; 人为破坏活动作为促发花岗岩石漠化的主导因素	以气温和降水为主导因素	我国年均16°C等温线以南地区	形成崩壁陡峭的“烂山地貌”
沙漠化	干旱、半干旱和亚湿润干旱沙漠地带非沙漠地区, 代表省份有新疆、甘肃等	疏松沙质地表; 人为过度经济活动; 干旱多风	地质背景和气候条件为沙漠化提供基础, 人类活动激发和加速进程; 副热带高压控制导致地区气候干燥, 成为主要的沙漠分布区	以人类活动为主导因素	主要分布于受副热带高压带控制区域(南北纬30°附近)	形成以风沙活动、沙丘起伏为主要标志的类似沙漠景观

表5 不同石漠化分区及特征^[92]

Table 5 Division and characteristics of different rocky desertification^[92]

八大岩溶地貌	分布范围	主要特征
中高山岩溶山地	滇东北、川西及四川盆地西部周边	地势高, 局部缺水, 草地退化, 旅游资源丰富
岩溶断陷盆地	滇东至四川攀西(昌)盐源地区及贵州西部	地形平坦, 光热条件好, 洼地底部多有落水洞, 竖井分布
岩溶高原	贵州中部长江与珠江流域分水岭地带的高原面	地形相对平坦, 洼地宽浅, 落水洞天窗发育, 以地下河为主
岩溶峡谷	南盘江、北盘江、金沙江、澜沧江等大江、大河的两岸	地形起伏大, 水资源丰富, 河流落差大
峰丛洼地	贵州高原向广西盆地过渡的斜坡地带	地形起伏大, 典型二元水系统结构, 水土流失严重
岩溶槽谷	黔东北、川东、湘西、鄂西以及渝东南、渝中、渝东北等地	地形起伏大, 以槽谷、峡谷、台地、洼地为主
峰林平原	桂中、桂东、湘南、粤北等地	地形较平坦, 以岩溶平原、峰林平原、峰林谷地岩溶地貌为主
溶丘洼地(槽谷)	湘中、湘南、鄂东、鄂中等地	地势较平坦, 以溶丘洼地、溶蚀丘陵、溶丘槽谷岩溶地貌为主

但是其受遥感数据源、石漠化评价指标及精度验证等问题的限制,具有很强的不确定性^[73]。

目前,主要遥感解译手段主要有目视解译法、人机交互解译法、监督分类法、非监督分类法、模型构建法和分类回归树(classification and regression tree, CART)方法等(表6)。20世纪70年代后半期,研究人员使用遥感技术对石漠化地区进行监测。随着研究的不断深化,单一的遥感影像已经不能满足对石漠化精准解译的需求。周忠发^[93]将遥感和地理信息系统(geographic information system, GIS)结合,制作贵州省喀斯特地区石漠化分布图,并分析影响其程度的主要参数及原因。Yang等人^[94]使用目视解译方法进行了广西北部喀斯特地区石漠化时空演变研究,结果表明,1990~2005年,研究区域石漠化增加了323.49 km²。宋同清等人^[95]利用人机交互解译方法对中国西南方地区的石漠化进行了研究,阐明西南喀斯特石漠化的空间分布及动态变化规律,结果表明,西南石漠化呈不断扩张的趋势,且扩张率持续增长。陈飞^[90]通过去除不可能发生石漠化的区域再运用CART决策树分类,建立一种集高准确度与高效率的石漠化解译方法,揭示石漠化发生发展的机制,得出研究区石漠化最大人为驱动力为人口密度的结论。习慧鹏等人^[96]基于高时空分辨率遥感影像图,对贵州省普定县石漠化空间分布信息进行反演,揭示了该区域石漠化呈“总体好转,局部恶化”的演变特征。冉晨等人^[97]基于LANDSAT和石漠化数据,利用ENVI5.3进行监督分类,揭示了石漠化景观格局对

土地利用变化的响应。王明明等人^[98]通过高精度影像识别提取喀斯特石漠化范围,利用岩石裸露率及植被覆盖度提取石漠化信息,揭示石漠化不同等级的时空演化规律,厘清石漠化分布与坡度及地表反照率的相关性。罗旭玲等人^[99]基于归一化差分植被指数、植被净初级生产力、地表反照率、坡度等数据,利用人机交互的方法解译石漠化,通过分析西南石漠化时空演变过程揭示其变化规律,得到在研究时段内,西南生态环境逐步改善的结论,其结果与宋同清等人^[95]的差异较大。其原因可能是评价指标的差异,由于不同学者思考角度不同,对不同评价指标界定不同,导致在指标选取时差异较大。

5 喀斯特生态系统服务模型

5.1 喀斯特生态系统服务的重要性与特殊性

生态系统服务是人类生存和发展的基础,也是生态功能区划以及生态环境建设和保护的重要科学依据^[100]。中国喀斯特地区是典型的生态脆弱区,水土流失、石漠化等生态问题对中国南方的生态安全和社会经济发展具有严重的威胁。喀斯特生态系统独特的地质和空间特征造就了多样的喀斯特环境,具有气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、生物多样性维持、食物生产等多种功能^[101]。因此,评估喀斯特生态服务空间分异是解决生态问题和保障生态服务供给安全的必然选择,对促进区域可持续发展具有重要意义。

表6 不同喀斯特石漠化解译方法、原理及各自优缺点

Table 6 The interpretation methods, principles, advantages and disadvantages of different karst rocky desertification

方法	原理	优点	不足
目视解译法	综合分析并建立影像解译标志从而确定石漠化区域	运用于小区域石漠化解译时精度较高	工作强度高,效率低下,难以量化,具有很强的主观性和不确定性
人机交互解译法	通过分级阈值建立解译标志,人工识别影像	具有普适性,应用广泛,结合人工分类和计算机的优点	工作量大,效率低,主观性强,解译结果准确性较低
监督分类法	通过训练样本的选择,再由计算机全自动解译完成分类	自动化程度高,分类便捷	由于受光谱混合现象的影响,精度不高
非监督分类法	将各类影响单元特征设置为中心点,基于最小距离法归类影像单元,然后对光谱特征进行重新分析,重复进行上述操作	不需要训练样本,仅依赖光谱特征直接进行分类	实用性较差,仅对小范围的解译具有一定的适用性
模型构建法	构建石漠化地区遥感影像信息提取模型	信息多源,结果稳定,普及性强	依赖模型,缺乏阈值标准
CART决策树分类方法	通过对预处理数据进行样本选择,再执行分类,生产决策树	高准确度,高效率	受研究区域限制,不适用于大尺度区域
实地调查	通过实地观测和记录解译石漠化	目的性强,在对小区域进行解译时精度高	区域小,工作强度高,效率低,主观性强

喀斯特地区土质疏松、地表裂隙，水土流失问题十分严重。基于喀斯特地区存在地下水流失这一特殊性，该地区的水土保持工作也相应的较其他地区有所不同，形成具有喀斯特特色的水土保持技术和模式。同时，喀斯特生态系统具有巨大的固碳潜力，每年因岩溶作用产生的碳汇为4.74 Tg C a⁻¹^[102]，净回收大气CO₂可达1800万t C a⁻¹^[103]，岩石风化碳汇量大约是植被碳汇的20%^[104]。除岩石风化碳汇之外，植物生长固碳的同时，其地下部分生物量生长和凋落物分解的碳储量也非常可观，中国西南喀斯特槽谷0~30 cm土层中土壤碳储量约为41.55~60.42 Mg C hm⁻²^[105]。可见喀斯特生态系统对固碳增汇，水土保持，维持生物多样性等生态系统服务功能都具有极大的促进作用^[106,107]。

5.2 取得的重要性进展和突破性成果

中国喀斯特地区的气候和土壤条件差异很大，生态系统敏感性强，不同的生态系统服务功能，如水土保持、固碳释氧和生物多样性等应采用不同的方法衡量^[108]。由于喀斯特生态系统服务功能信息不完善、测量误差大、人地矛盾突出，利用多种生态系统服务功能模型评估喀斯特生态系统服务效益既紧迫又具有挑战性。以欧阳志云等人^[109]、Costanza等人^[110]、谢高地等人^[111]为代表的国内外学者从不同角度对生态系统

服务的理论、评估等进行了系统研究。然而，区域尺度上喀斯特地区不同生态系统的效应识别与量化一直是国内外研究的难点和热点。目前，关于喀斯特生态系统服务的研究相对较少，以往的研究多采用价值估算法、物质质量评估法、价值当量计算法、影子工程法、模型评估等多种方法^[112]，以上方法概念简单、易于评估和计算。

目前，喀斯特生态系统服务功能的整体提升已成为国内外的研究热点，国内外许多学者在当地开展了研究。Strand等人^[108]和王克林等人^[113]认为，我国生态保护与修复亟须从主要追求植被覆盖的“绿化”转向提升生态系统服务和区域发展质量，进入生态系统服务功能的全面提升和特色产业融合发展的新阶段，促进生态系统质量的整体改善和生态产品供给能力的全面增强。但由于生态系统脆弱和敏感，这方面的研究仍存在重大挑战。人类活动对喀斯特生态系统服务功能的变化起着重要作用，现有数据集相对缺乏以及生态系统服务难以估计的地区，应采用卫星图像和新方法，通过适当的方法和可靠的多尺度数据集，持续监测生态系统服务的变化，以确保区域可持续发展。

研究区不同，选取的评估指标和方法也各有差异(表7)。全国、区域、省域的评估指标相对全面，但评估方法较为单一，不同地域特征和估算方法对结果有

表7 不同喀斯特生态系统服务诊断方法的研究对比

Table 7 Comparison of diagnostic methods of different karst ecosystem services

评估方法	评估指标	研究区域	研究时段(年)	生态服务价值(亿元)	参考文献
价值估算法	食物生产、原材料、水源涵养、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土壤形成与保护、保持营养循环、生物多样性、娱乐文化	中国喀斯特	1992~2015	157.25	[114]
价值量估算法、典范对应分析方法(canonical correspondence analysis, CCA)	水源涵养、土壤形成、生物多样性、气体调节、土壤保持、营养物循环、有机质生产、娱乐文化	桂西北	1985	1096.52	[115]
			2000	1033.4	
			2005	1062.57	
价值当量计算法	气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、废物处理、生物多样性维持、食物生产、原材料生产、休闲娱乐	贵州省	2005	1610.43	[116]
			2010	2357.86	
物质质量评估法、价值量评估法	固碳制氧、土壤肥力、产品供给、涵养水源、土壤保持	贵州省花江峡谷	2020	4328.89	[117]
			2010	0.2	
影子工程法、市场价值法、费用分析法	涵养水源、物质积累	五马河流域	2015	13.2	[118]
			2000	41.51	
市场价值法、影子工程法	土壤保持、水量调节	贵阳市观山湖区	2010	56.76	[119]
			2020	62.96	

一定影响。例如,胡泽银^[114]利用价值估算法,选取食物生产、生物多样性、娱乐文化等9个指标,评估了中国1992~2015年喀斯特生态系统服务价值净收益为23.4亿美元。张明阳等人^[115]利用价值估算法评估了桂西北地区1982~2005年的生态服务价值。周传艳等人^[116]依据气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护等8项生态服务功能指标,采用价值当量计算法,得出贵州省2005、2010、2020年的生态服务价值分别为1610.43、2357.86和4328.89亿元。凡非得等人^[21]采用层次分析法和多因子综合评价法建立指标体系,分析了桂西北喀斯特地区生物多样性保护、土壤保持、水源涵养、石漠化控制和产品提供5项生态系统服务功能的重要性的及其空间分布特征。高渐飞和熊康宁^[117]利用物质质量评估法和价值量评估法研究了贵州省花江峡谷固碳制氧、土壤肥力等5个生态系统服务功能。汪金梅等人^[118]利用影子工程法、市场价值法、费用分析法研究了五马河流域涵养水源和物质积累等。李亦秋等人^[119]采用市场价值法和影子工程法评估了贵阳市观山湖区的土壤保持和水量调节。

综上所述,以往研究主要集中在中小尺度且多集中于省域、县域、流域、峡谷等小尺度内,中小尺度喀斯特生态系统评估有利于区域生态系统合理利用和管理,但不能厘清喀斯特生态系统服务的整体特征和功能。

6 存在不足与待改进方向

以往研究在影响诊断喀斯特生态系统健康与可持续性的碳酸盐岩风化成土速率计算、土壤水诊断、水土流失评价、石漠化解译、生态系统服务模型等方面取得了显著进展,为后续研究提供了理论和技术基础,但是还存在一些不足。本文通过整理以往研究的不足及存在的问题,提出了今后需要重点关注的方向。

成土速率方面,以往研究多基于室内模拟和定位观测法来推算,重点解决了监测站点或剖面尺度的问题。但是,该方法在实际应用过程中尺度难以匹配,空间尺度的动态成土速率难以获取,影响成土速率的因素也尚不清晰。因此,未来研究应重点关注:建立高精度成土速率时空动态图谱,实现成土速率的时空动态化;揭示成土速率的影响因素。

土壤水方面,以往研究多采用不同的方法和数据从各空间尺度上计算土壤水的量级并分析其演变趋势,但是,缺乏对长时间尺度上植被增加对土壤水影响的

研究,基于实测数据的土壤水产品可靠性评估存在部分盲区。因此,未来研究应重点关注:在长时间尺度上研究植被增加对土壤水变化的影响;基于高精度遥感数据揭示土壤水的分布规律与变化特征。

水土流失方面,以往研究多采用径流小区法、¹³⁷Cs测试法以及RUSLE模型进行小区域研究,但是,缺乏实测资料,也尚未建立起较完整的水流失监测体系。因此,未来研究应重点关注:针对喀斯特地区地貌特征和土壤性质强化小区监测工作;水土保持的重点应该放在地表,改进和优化土壤侵蚀风险评价模型。

石漠化方面,以往研究多集中在石漠化解译、方法精度验证、分级指标拟定、时空演变规律探究及石漠化地区植被变化等研究,然而,不同区域石漠化驱动因素诊断不明,生态系统服务功能对石漠化治理的响应不清晰。因此,未来研究应重点关注:揭示气候变化和人类活动对不同区域石漠化的影响;阐明石漠化治理对生态系统服务功能的贡献。

生态系统服务方面,以往研究主要利用价值估算和影子工程法等评估中小尺度喀斯特生态系统服务功能,然而方法泛化,尚未形成针对喀斯特地区的评估指标和方法,并且没有综合自然-社会因素探讨喀斯特生态系统的驱动力。因此,未来研究应重点关注:大尺度喀斯特生态系统服务评估和厘清其整体特征与功能;引入图形对比等前沿方法,综合分析各因子对喀斯特生态服务功能的影响。

7 结论

本文从影响诊断喀斯特生态系统健康与可持续性的碳酸盐岩风化成土速率计算、土壤水诊断、水土流失评价、石漠化解译、生态系统服务模型5个方面进行了系统梳理。总结发现:(1)碳酸盐岩化学风化虽然很快,但是由于其酸不溶物含量低,导致其成土速率极其缓慢。(2)土壤少且分布不连续,但是土壤含水量却比较高。(3)土壤侵蚀模数低,且存在一定比例的地下漏失现象。(4)石漠化的演变可分为单变式、渐进式和返变式3种经典类型。(5)喀斯特生态系统服务功能的评价模型要基于成土速率来进行修正水土保持功能和基于岩溶地质碳汇修正气候调节功能。

总之,本文系统总结梳理了诊断中国喀斯特生态系统健康与可持续性的方法和取得的重大进展,并进一步从“岩-土-水-石-生”的角度提出了未来的研究方向

和突破重点, 以期为维护喀斯特地区的生态安全和可持续发展提供科技支撑. 因此, 当前诊断喀斯特生态系统健康的指标、方法和模型亟须改进和创新, 要充分体现喀斯特地区的特殊性和模型方法的匹配性, 提高

监测数据的时空分辨率, 特别是亟须建立喀斯特社会-生态系统耦合模型, 准确刻画喀斯特生态系统对气候变化和人类活动的响应过程, 提升诊断模型的准确度和可预测性.

参考文献

- 1 Ford D C, Williams P W. Karst Geomorphology and Hydrology. London: Unwin Hyman, 1989
- 2 Lu Y R. Karst in China—Landscape, Types and Rules (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1986 [卢耀如. 中国岩溶——景观、类型、规律. 北京: 地质出版社, 1986]
- 3 Yuan D X. Karstification in China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1993 [袁道先. 中国岩溶学. 北京: 地质出版社, 1993]
- 4 Ren M E, Liu Z Z. Introduction to Karstology (in Chinese). Beijing: Commercial Press, 1983 [任美镠, 刘振中. 岩溶学概论. 北京: 商务印书馆, 1983]
- 5 Editorial Committee of Physical Geography of China, Chinese Academy of Sciences. China's Natural Geography and Geomorphology (in Chinese). Beijing: Science Press, 1981 [中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理地貌. 北京: 科学出版社, 1981]
- 6 Song L H. Evolution of karst geomorphology and hydrogeology in south Dushan, Guizhou Province, China. Ann Soc Géol Belgique, 1985, 108: 227–231
- 7 Lu Y R. Models of karst geomorphological evolutions in China (in Chinese). Geogr Res, 1986, 4: 25–35 [卢耀如. 中国喀斯特地貌的演化模式. 地理研究, 1986, 4: 25–35]
- 8 Yang M D. Characteristics and hydrodynamic conditions of cave development in karst gorge districts (in Chinese). Carsol Sin, 1998, 3: 5–13 [杨明德. 岩溶峡谷区溶洞发育特征及水动力条件. 中国岩溶, 1998, 3: 5–13]
- 9 Zhu X W. Karst Geomorphology and Cave Research in Guilin (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1988 [朱学稳. 桂林岩溶地貌与洞穴研究. 北京: 地质出版社, 1988]
- 10 Zhu X W. New considerations on characteristic and evolution of Fenglin karst (in Chinese). Carsol Sin, 1991, 1: 54–65 [朱学稳. 峰林喀斯特的性质及其发育和演化的新思考. 中国岩溶, 1991, 1: 54–65]
- 11 Sun C X, Wang S J, Zhou D Q, et al. Insoluble residues of carbonate rocks as source material for red weathering crusts in karst regions of Guizhou Province, China (in Chinese). Acta Mineral Sin, 2002, 3: 235–242 [孙承兴, 王世杰, 周德全, 等. 碳酸盐岩酸不溶物作为贵州岩溶区红色风化壳主要物质来源的证据. 矿物学报, 2002, 3: 235–242]
- 12 Wang S J, Li Y B, Li R L. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming (in Chinese). Quat Sci, 2003, 6: 657–666 [王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 6: 657–666]
- 13 Chen X L, Wang J F, Kong X, et al. Advances in structure and function of microbial communities in karst areas of China (in Chinese). J Microbiol, 2023, 43: 106–114 [陈显磊, 王剑峰, 孔鑫, 等. 中国喀斯特地区微生物群落结构和功能的研究进展. 微生物学杂志, 2023, 43: 106–114]
- 14 Liang Y H, Zhang J Y, Fan Y L. Study on diagnostic characteristics and risk evaluation of degraded ecosystem in karst area——A case study of Bijie karst rocky desertification (in Chinese). Res Soil Water Conserv, 2013, 20: 240–245 [梁玉华, 张军以, 樊云龙. 喀斯特生态系统退化诊断特征及风险评价研究——以毕节石漠化为例. 水土保持研究, 2013, 20: 240–245]
- 15 Gao X R. Theory and application of the evaluation on agricultural soil water utility based on water cycle simulation (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013 [高学睿. 基于水循环模拟的农田土壤水效用评价方法与应用. 博士学位论文. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013]
- 16 Xu C, McDowell N G, Fisher R A, et al. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. Nat Clim Chang, 2019, 9: 948–953
- 17 Bai X Y, Wang S J. Relationships between soil loss tolerance and karst rocky desertification (in Chinese). J Nat Resour, 2011, 26: 1315–1322 [白晓永, 王世杰. 岩溶区土壤允许流失量与土地石漠化的关系. 自然资源学报, 2011, 26: 1315–1322]
- 18 Li J Y, Wang C F, Fan T Z. Weathering crust of carbonate rock and process of karst earth formation (in Chinese). Carsol Sin, 1991, 1: 32–41 [李景阳, 王朝富, 樊廷章. 试论碳酸盐岩风化壳与喀斯特成土作用. 中国岩溶, 1991, 1: 32–41]
- 19 Hu G Y, Dong Z B, Lu J F, et al. Spatial pattern of aeolian desertification and its causes in the Yellow River catchment (in Chinese). J Desert Res, 2021, 41: 213–224 [胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 黄河流域沙漠化空间格局与成因. 中国沙漠, 2021, 41: 213–224]
- 20 Su T, Xiong K N, Chen L S. Change of land use and landscape pattern under rocky desertification control (in Chinese). Southwest China J Agric Sci, 2022, 35: 446–452 [舒田, 熊康宁, 陈丽莎. 石漠化治理下土地利用与景观格局变化. 西南农业学报, 2022, 35: 446–452]
- 21 Fan F D, Luo J, Wang K L, et al. Assessment and spatial analysis of ecosystem service importance in karst area of Northwest Guangxi (in

- Chinese). *Chin J Ecol*, 2011, 30: 804–809 [凡非得, 罗俊, 王克林, 等. 桂西北喀斯特地区生态系统服务功能重要性评价与空间分析. *生态学杂志*, 2011, 30: 804–809]
- 22 Wang S J, Sun C X, Feng Z G, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the limestone weathering profile in Jishou, western Hunan Province, China (in Chinese). *Acta Mineral Sin*, 2002, 22: 19–29 [王世杰, 孙承兴, 冯志刚, 等. 发育完整的灰岩风化壳及其矿物学与地球化学特征. *矿物学报*, 2002, 22: 19–29]
- 23 Li J Y, Zhu L J, Wang C F, et al. Weathering crust of carbonate rocks and process of karst soil formation (in Chinese). *Guizhou Geol*, 1996, 13: 139–145 [李景阳, 朱立军, 王朝富, 等. 碳酸盐岩风化壳及喀斯特成土作用研究. *贵州地质*, 1996, 13: 139–145]
- 24 Fu B C, Huang Y. An approach to forming and evolution of laterite overlying carbonate rocks (in Chinese). *Chin J Geol*, 2003, 38: 128–136, 141–142 [符必昌, 黄英. 试论碳酸盐岩上覆红土的形成模式及演化趋势. *地质科学*, 2003, 38: 128–136, 141–142]
- 25 Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, et al. A preliminary study on the weathering soil formation of carbonate rocks (in Chinese). *Sci China Ser D: Earth Sci*, 1999, 29: 441–449 [王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究. *中国科学D辑: 地球科学*, 1999, 29: 441–449]
- 26 Yao C H, Jiang Z C, Yao D X. Vegetation karst effects on the karst area of Southwest China (in Chinese). *Acta Geosci Sin*, 2001, 22: 159–164 [姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应. *地球学报*, 2001, 22: 159–164]
- 27 West N, Kirby E, Bierman P, et al. Regolith production and transport at the Susquehanna Shale Hills Critical Zone Observatory, Part 2: Insights from meteoric ^{10}Be . *J Geophys Res Earth Surf*, 2013, 118: 1877–1896
- 28 Cao J H, Yuan D X, Pei G X. Some soil features in karst ecosystem (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2003, 18, 37–44 [曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤. *地球科学进展*, 2003, 18: 37–44]
- 29 Wei Q F, Chen H Z, Wu Z D, et al. The geochemical characteristics of limestone soils in Longgang area, Guangxi (in Chinese). *Acta Pedol Sin*, 1983, 20: 30–42 [韦启福, 陈鸿昭, 吴志东, 等. 广西(山弄)岗南自然保护区石灰土的地球化学特征. *土壤学报*, 1983, 20: 30–42]
- 30 Cai Z X. Discussion on soil erosion in karst zone in Guangxi (in Chinese). *Mount Res*, 1989, 7: 255–260 [柴宗新. 试论广西岩溶区的土壤侵蚀. *山地研究*, 1989, 7: 255–260]
- 31 Velbel M A, Price J R. Solute geochemical mass balances and mineral weathering rates in small watersheds: Methodology, recent advances, and future directions. *Appl Geochem*, 2007, 22: 1682–1700
- 32 Jin L, Ravella R, Ketchum B, et al. Mineral weathering and elemental transport during hillslope evolution at the Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory. *Geochim Cosmochim Acta*, 2010, 74: 3669–3691
- 33 Duan L, Hao J M, Zhou Z P, et al. Experimental determination of the soil weathering rate (in Chinese). *J Environ Sci*, 2002, 2: 145–149 [段雷, 郝吉明, 周中平, 等. 土壤风化速率的实验测定. *环境科学学报*, 2002, 2: 145–149]
- 34 Warfvinge P, Sverdrup H. Calculating critical loads of acid deposition with PROFILE—A steady-state soil chemistry model. *Water Air Soil Pollut*, 1992, 63: 119–143
- 35 Hodson M E, Langan S J, Wilson M J. A critical evaluation of the use of the PROFILE Model in calculating mineral weathering rates. *Water Air Soil Pollut*, 1997, 98: 79–104
- 36 Morgan R P C. *Soil Erosion and Conservation*. New York: Blackwell Publishing, 1991. 484
- 37 Chamberlin J L. Soil loss tolerance: Fact or myth. *J Soil Water Conserv*, 1987, 42: 155–160
- 38 Mao Z Z, Zhang B. Geological characteristics of Maolan karst forest (in Chinese). *J Guizhou Agric Coll*, 1987, 2: 51–63 [毛志中, 张波. 茂兰喀斯特森林区地质特点. *贵州农学院学报*, 1987, 2: 51–63]
- 39 Zhang M L, Deng Z Q. The soil and its formation in the karst region in South China (in Chinese). *J Guizhou Instit Technol*, 1994, 1: 67–75 [张美良, 邓自强. 我国南方喀斯特地区的土壤及其形成. *贵州工学院学报*, 1994, 1: 67–75]
- 40 Yang H K, Cheng S Z. Study on community biomass of Maolan karst forest in Guizhou (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 1991, 4: 307–312 [杨汉奎, 程仕泽. 贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究. *生态学报*, 1991, 4: 307–312]
- 41 Su W C, Zhou J Z. “Stony desertification” and control countermeasures in Guizhou (in Chinese). *Resour Environ Yangtze River Basin*, 1995, 2: 177–182 [苏维词, 周济祚. 贵州喀斯特山地的“石漠化”及防治对策. *长江流域资源与环境*, 1995, 2: 177–182]
- 42 Li Y B, Wang S J, Wei C F, et al. Spatial distribution of allowable soil loss in the carbonate area of Guizhou Province (in Chinese). *Earth Environ*, 2006, 4: 36–40 [李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 等. 贵州省碳酸盐岩地区土壤允许流失量的空间分布. *地球与环境*, 2006, 4: 36–40]
- 43 Cao J H, Jiang Z C, Yang D S, et al. Soil erosion and rocky desertification in the karst areas of Guizhou Province are restricted by the karst environment (in Chinese). *Soil Water Conserv China*, 2009, 1: 20–23 [曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 等. 贵州省岩溶区水土流失、石漠化受岩溶环境制约. *中国水土保持*, 2009, 1: 20–23]
- 44 Jiang Z C, Pei J G, Xia R Y, et al. Progress and important activities of karst research during the 11th Five-Year Plan in China (in Chinese). *Carso Sin*, 2010, 4: 349–354 [蒋忠诚, 裴建国, 夏日元, 等. 我国“十一五”期间的岩溶研究进展与重要活动. *中国岩溶*, 2010, 4: 349–354]
- 45 Qian Q H, Wang S J, Bai X Y, et al. Assessment of soil erosion in karst critical zone based on soil loss tolerance and source-sink theory of positive and negative terrains (in Chinese). *J Geogr*, 2018, 11: 2135–2149 [钱庆欢, 王世杰, 白晓永, 等. 基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究. *地理学报*, 2018, 11: 2135–2149]

- 46 Li Q, Wang S J, Bai X Y, et al. Change detection of soil formation rate in space and time based on multi source data and geospatial analysis techniques. *Remote Sens*, 2020, 12: 121
- 47 Yang J L, Zhang G L, Huang L M. Rock weathering and soil formation rates of a forested watershed in the typical subtropical granite area (in Chinese). *Acta Pedol Sin*, 2013, 50: 253–259 [杨金玲, 张甘霖, 黄来明. 典型亚热带花岗岩地区森林流域岩石风化和土壤形成速率研究. *土壤学报*, 2013, 50: 253–259]
- 48 Oliva P, Viers J, Dupré B. Chemical weathering laws in granitic crystalline environment. *Chem Geol*, 2003, 202: 223–254
- 49 Likens G E, Bormann F H, Pierce R S, et al. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. New York: Springer-Verlag, 1977
- 50 Han G L, Liu C Q. Hydrogeochemistry of rivers in Guizhou Province, China: Constraints on crustal weathering in karst terrain (in Chinese). *Prog Earth Sci*, 2005, 20: 394–406 [韩贵琳, 刘丛强. 贵州喀斯特地区河流的研究——碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征. *地球科学进展*, 2005, 20: 394–406]
- 51 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 (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2018, 32: 303–311 [殷超, 周忠发, 田衷璋, 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. *水土保持学报*, 2018, 32: 303–311]
- 52 Adair E C, Reich P B, Trost J J, et al. Elevated CO₂ stimulates grassland soil respiration by increasing carbon inputs rather than by enhancing soil moisture. *Glob Change Biol*, 2011, 17: 3546–3563
- 53 Bai X Y, Wang S J, Xiong K N. Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification land: Indications for restoration strategies. *Land Degrad Dev*, 2013, 24: 47–56
- 54 Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area. *Sci Rep*, 2018, 8: 641
- 55 Foody G M. Soil moisture content ground data for remote sensing investigations of agricultural regions. *Int J Remote Sens*, 1991, 12: 1461–1469
- 56 Cassel D K, Klute A. Water potential: Tensiometry. In: Klute A, ed. *Methods of Soil Analysis: Part I—Physical and Mineralogical Methods*. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. 493–545
- 57 Bijleveld R A. Tell us a combined surface temperature soil moisture and evaporation mapping approach. In: *The 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1978. 20–25
- 58 Pratt D A, Ellyett C D. The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology. *Remote Sens Environ*, 1979, 8: 151–168
- 59 Schmugge T. Remote sensing of surface soil moisture. *J Appl Meteorol*, 1978, 17: 1549–1557
- 60 Deng Y C, Xu Y H. Review of soil moisture measurement methods (in Chinese). *Hydrological*, 2007, 27: 20–24 [邓英春, 许永辉. 土壤水分测量方法研究综述. *水文*, 2007, 27: 20–24]
- 61 Wang X, Zhang Z X, Zhao X L, et al. A review of researches on monitoring of soil moisture by remote sensing (in Chinese). *Chin J Soil Sci*, 2007, 44: 157–163 [汪潇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感监测土壤水分研究综述. *土壤学报*, 2007, 44: 157–163]
- 62 Liu Q, Du J Y, Shi J C, et al. Remote sensing inversion of surface soil moisture over the Qinghai-Tibet Plateau and analysis of its spatial distribution and variation trend over the years (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2013, 43: 1677–1690 [刘强, 杜今阳, 施建成, 等. 青藏高原表层土壤湿度遥感反演及其空间分布和多年变化趋势分析. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43: 1677–1690]
- 63 Zhang X N, Wang K L, Zhang W, et al. Effect of land use on soil moisture on hillslope in karst peak-cluster depression areas of Northwest Guangxi (in Chinese). *Soil Bull*, 2009, 40: 1250–1254 [张笑楠, 王克林, 张伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地坡面土地利用对土壤水分的影响. *土壤通报*, 2009, 40: 1250–1254]
- 64 Song T Q, Peng W X, Zeng F P, et al. Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in Mulun National Natural Reserve in karst area (in Chinese). *J Appl Ecol*, 2009, 20: 98–104 [宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性. *应用生态学报*, 2009, 20: 98–104]
- 65 Huang D M, Chen X M, Li X L, et al. Study on variation of soil moisture in karst regions, Southwest China (in Chinese). *Chin Agron Bull*, 2010, 26: 207–212 [黄代民, 陈效民, 李孝良, 等. 西南喀斯特地区土壤水分变异性研究. *中国农学通报*, 2010, 26: 207–212]
- 66 Liu H L, Jiang T M, Liu H B, et al. Impact of land use on spatio-temporal variation of soil moisture of sloping upland in karst mountainous area (in Chinese). *J Soil Sci*, 2005, 42: 428–433 [刘海隆, 蒋太明, 刘洪斌, 等. 不同土地利用方式对岩溶山区旱坡地土壤水分时空分异的影响. *土壤学报*, 2005, 42: 428–433]
- 67 Li Y, Piao S L, Li L Z, et al. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Sci Adv*, 2018, 10: 1126
- 68 Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Spatiotemporal dynamics of soil moisture in the karst areas of China based on reanalysis and observations data. *J Hydrol*, 2020, 585: 124744
- 69 Xiao B Q, Bai X Y, Zhao C W, et al. Responses of carbon and water use efficiencies to climate and land use changes in China's karst areas. *J Hydrol*, 2023, 617: 128968
- 70 Higgitt D L, Lu X X. Sediment delivery to the three gorges: I. Catchment controls. *Geomorphology*, 2001, 41: 157–169
- 71 Zhang X B, Wang S J, He X B, et al. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes (in

- Chinese). *Earth Environ*, 2007, 35: 202–206 [张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. *地球与环境*, 2007, 35: 202–206]
- 72 Ma Q H, Zhang K L. Progresses and prospects of the research on soil erosion in karst area of Southwest China (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2018, 33: 1130–1141 [马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望. *地球科学进展*, 2018, 33: 1130–1141]
- 73 Su W C. Soil erosion deterioration and its control in karst mountainous regions in Guizhou Province (in Chinese). *Carsol Sin*, 2001, 20: 217–223 [苏维词. 贵州喀斯特山区的土壤侵蚀性退化及其防治. *中国岩溶*, 2001, 20: 217–223]
- 74 Gao R X, Gao H D, Song J P, et al. Influence of slope length on soil erosion in yellow sloping farmland of karst (in Chinese). *Res Soil Water Conserv*, 2018, 25: 53–57 [高儒学, 高华端, 宋江平, 等. 坡长对贵州喀斯特区黄壤坡耕地土壤侵蚀的影响. *水土保持研究*, 2018, 25: 53–57]
- 75 Wang K L, Chen H S, Zeng F P, et al. Ecological research supports eco-environmental management and poverty alleviation in karst region of Southwest China (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2018, 33: 213–222 [王克林, 陈洪松, 曾馥平, 等. 生态学研究支撑喀斯特区域生态环境治理与科技扶贫. *中国科学院院刊*, 2018, 33: 213–222]
- 76 Chen H S, Feng T, Li C Z, et al. Characteristics of soil erosion in the karst regions of Southwest China: Research advance and prospective (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2018, 32: 10–16 [陈洪松, 冯腾, 李成志, 等. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望. *水土保持学报*, 2018, 32: 10–16]
- 77 Peng J, Yang M D. On the present soil erosion situation of Huajiang Karst Gorge in Guizhou Province (in Chinese). *J Mount Sci*, 2001, 6: 511–515 [彭建, 杨明德. 贵州花江喀斯特峡谷水土流失状态分析. *山地学报*, 2001, 6: 511–515]
- 78 Zhang Z W, Fu W L, Zhang H, et al. Study on soil erosion of different degrees in karst region by using ^{137}Cs technique (in Chinese). *J Mount Sci*, 2007, 25: 302–308 [张治伟, 傅瓦利, 张洪, 等. 岩溶坡地土壤侵蚀强度的 ^{137}Cs 法研究. *山地学报*, 2007, 25: 302–308]
- 79 Wu S Z, Zhu W X, Shu W C, et al. Experiment on soil erosion and nutrient loss in karst area—A case in Jiuchang Town, Xiuwen, Guiyang (in Chinese). *Carsol Sin*, 2005, 24: 202–205 [吴士章, 朱文孝, 苏维词, 等. 喀斯特地区土壤侵蚀及养分流失定位试验研究——以贵阳市修文县久长镇为例. *中国岩溶*, 2005, 24: 202–205]
- 80 Wang Z J, Liu S J, Shu Y. Spatial-temporal characteristic of soil erosion hotspots in Guiyang city of karst plateau mountainous region in 2008–2018 (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2020, 34: 94–102, 110 [王志杰, 柳书俊, 苏媛. 喀斯特高原山地贵阳市2008–2018年土壤侵蚀时空特征与侵蚀热点变化分析. *水土保持学报*, 2020, 34: 94–102, 110]
- 81 Chen X P. Research on characteristics of soil erosion in karst mountainous region environment (in Chinese). *J Soil Eros Soil Water Conserv*, 1997, 3: 31–36 [陈晓平. 喀斯特山区环境土壤侵蚀特性的分析研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3: 31–36]
- 82 Bai X Y, Zhang X B, Wang S J, et al. Estimating sediment deposition rates by the ^{137}Cs technique in karst depression of Chongtuo, Puding County, Guizhou Province (in Chinese). *Earth Environ*, 2009, 37: 142–146 [白晓永, 张信宝, 王世杰, 等. 普定冲头峰丛洼地泥沙沉积速率的 ^{137}Cs 法测定. *地球与环境*, 2009, 37: 142–146]
- 83 He Y B, Li H, Zhang X B, et al. ^{137}Cs method study on soil erosion and sediment yield in grass-covered peak cluster depression in Maolan, Guizhou (in Chinese). *Carsol Sin*, 2009, 28: 181–188 [何永彬, 李豪, 张信宝, 等. 贵州茂兰峰丛草地洼地小流域侵蚀产沙的 ^{137}Cs 法研究. *中国岩溶*, 2009, 28: 181–188]
- 84 Long M Z, Wu K H, Xiong K N. Assessment of applicability of the WEPP model (hillslope version) for soil erosion in karst rock desertification area, Guizhou Province (in Chinese). *Carsol Sin*, 2014, 33: 201–207 [龙明忠, 吴克华, 熊康宁. WEPP模型(坡面版)在贵州石漠化地区土壤侵蚀模拟的适用性评价. *中国岩溶*, 2014, 33: 201–207]
- 85 Wang S J. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification (in Chinese). *Carsol Sin*, 2002, 21: 5 [王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. *中国岩溶*, 2002, 21: 5]
- 86 Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Sci Rev*, 2014, 132: 1–12
- 87 Wang Z G, Wan M C, Sun J J, et al. Review of studies on soil formation rate in karst rocky desertification region of Southwest China (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Instit*, 2015, 32: 64–72 [王志刚, 万木春, 孙佳佳, 等. 西南喀斯特石漠化区土壤形成速率研究综述. *长江科学院院报*, 2015, 32: 64–72]
- 88 Guo B, Wei C X, Yu Y. The dominant influencing factors of desertification changes in the source region of Yellow River: Climate change or human activity? *Sci Total Environ*, 2021, 813: 152512
- 89 Peng X, Dai Q, Li C, et al. Role of underground fissure flow in near-surface rainfall-runoff process on a rock mantled slope in the karst rocky desertification area. *Eng Geol*, 2018, 243: 10–17
- 90 Chen F. Spatial-temporal evolution processes and driving forces of karst rocky desertification in the typical karst valley area (in Chinese). Master Dissertation. Guiyang: Guizhou Normal University, 2018 [陈飞. 典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及驱动力研究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州师范大学, 2018]
- 91 Bai X Y, Wang S J, Chen Q W, et al. Spatio-temporal evolution process and its evaluation method of karst rocky desertification in Guizhou Province (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2009, 64: 609–618 [白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价. *地理学报*, 2009, 64: 609–618]

- 92 National Development and Reform Commission. Outline of Comprehensive Control Plan for Rocky Desertification in Karst Areas (2006–2015) (in Chinese). 2008 [国家发展和改革委员会. 岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006–2015). 2008]
- 93 Zhou Z F. Application of remote sensing and GIS technology for land desertification in Guizhou karst region (in Chinese). *Bull Soil Water Conserv*, 2001, 21: 52–54, 66 [周忠发. 遥感和GIS技术在贵州喀斯特地区土地石漠化研究中的应用. *水土保持通报*, 2001, 21: 52–54, 66]
- 94 Yang Q, Wang K, Zhang C, et al. Spatio-temporal evolution of rocky desertification and its driving forces in karst areas of northwestern Guangxi, China. *Environ Earth Sci*, 2011, 64: 383–393
- 95 Song T Q, Peng W X, Du H, et al. Spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in Southwest China (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 5328–5341 [宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 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. *生态学报*, 2014, 34: 5328–5341]
- 96 Xi H P, Wang S J, Bai X Y, et al. Spatio-temporal characteristics of rocky desertification in typical karst areas of Southwest China: A case study of Puding County, Guizhou Province (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2018, 38: 8919–8933 [习慧鹏, 王世杰, 白晓永, 等. 西南典型喀斯特地区石漠化时空演变特征——以贵州省普定县为例. *生态学报*, 2018, 38: 8919–8933]
- 97 Ran C, Bai X Y, Tan Q, et al. Response of landscape pattern of karst rocky desertification to land-use change in a typical karst area (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2018, 38: 8901–8910 [冉晨, 白晓永, 谭秋, 等. 典型喀斯特地区石漠化景观格局对土地利用变化的响应. *生态学报*, 2018, 38: 8901–8910]
- 98 Wang M M, Wang S J, Bai X Y, et al. Evolution characteristics of karst rocky desertification in typical small watershed and the key characterization factor and driving factor (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2019, 39: 6083–6097 [王明明, 王世杰, 白晓永, 等. 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素. *生态学报*, 2019, 39: 6083–6097]
- 99 Luo X L, Wang S J, Bai X Y, et al. Analysis of spatio-temporal evolution of rocky desertification in Southwest karst area (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2021, 41: 680–693 [罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 等. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析. *生态学报*, 2021, 41: 680–693]
- 100 Zhang G B, Zhang G Y. A brief analysis of the genesis of karst microland and maintain of water and soil in response to karst microland (in Chinese). *Henan Water Resour South-to-North Water Divers*, 2012, (4): 65–66 [张广波, 张广英. 浅析贵州喀斯特微地貌的成因及对水土保持影响. *河南水利与南水北调*, 2012, (4): 65–66]
- 101 Liu Y. Soil erosion and soil conservation in karst rocky desertification areas (in Chinese). *Guide Sci Educat (Electron Ver)*, 2013, 12: 158 [刘洋. 喀斯特石漠化地区的水土流失与水土保持. *科教导刊(电子版)*, 2013, 12: 158]
- 102 Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China, 1981–2000 (in Chinese). *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2007, 37: 804–812 [方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007, 37: 804–812]
- 103 Gong S, Wang S, Bai X, et al. Response of the weathering carbon sink in terrestrial rocks to climate variables and ecological restoration in China. *Sci Total Environ*, 2020, 750: 141525
- 104 Zhang S R, Bai X Y, Zhao C W, et al. China’s carbon budget inventory from 1997 to 2017 and its challenges to achieving carbon neutral strategies. *J Clean Prod*, 2022, 154: 130966
- 105 Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nat Sustain*, 2018, 1: 44–50
- 106 Bai X Y, Zhang S R, Li C J, et al. A carbon-neutrality-capacity index for evaluating carbon sink contributions. *Environ Sci Ecotechnol*, 2023, 15: 100237
- 107 Li C J, Bai X Y, Tan Q, et al. High-resolution mapping of the global silicate weathering carbon sink and its long-term changes. *Glob Change Biol*, 2022, 28: 4377–4394
- 108 Strand J, Soares-Filho B, Costa M H, et al. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest’s Ecosystem Services. *Nat Sustain*, 2018, 1: 657–664
- 109 Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological economic values (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 1999, 19: 607–613 [欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19: 607–613]
- 110 Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Glob Environ Change*, 2014, 26: 152–158
- 111 Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China (in Chinese). *Resour Sci*, 2015, 37: 1740–1746 [谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37: 1740–1746]
- 112 Huang C H, Yang J, Zhang W J. Development of ecosystem services evaluation models: Research progress (in Chinese). *Chin J Ecol*, 2013, 32: 3360–3367 [黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. *生态学杂志*, 2013, 32: 3360–3367]
- 113 Wang K L, Yue Y M, Chen H S, et al. Mechanisms and realization pathways for integration of scientific poverty alleviation and ecosystem services enhancement (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2020, 35: 1264–1272 [王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径. *中国科学院院刊*, 2020, 35: 1264–1272]
- 114 Hu Z Y. Karst ecosystem service value estimation and its spatiotemporal evolution (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: University of

- Chinese Academy of Sciences, 2020 [胡泽银. 喀斯特生态系统服务价值估算及其时空演变特征. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2020]
- 115 Zhang M Y, Wang K L, Chen H S, et al. Quantified evaluation and analysis of ecosystem services in karst areas based on remote sensing (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2009, 29: 5891–5901 [张明阳, 王克林, 陈洪松, 等. 喀斯特生态系统服务功能遥感定量评估与分析. *生态学报*, 2009, 29: 5891–5901]
- 116 Zhou C Y, Chen X, Liu X L, et al. Assessment of karst regional ecosystem service functions based on land use change: A case study in Guizhou, China (in Chinese). *Chin J Appl Environ Biol*, 2011, 17: 174–179 [周传艳, 陈训, 刘晓玲, 等. 基于土地利用的喀斯特地区生态系统服务功能价值评估——以贵州省为例. *应用与环境生物学报*, 2011, 17: 174–179]
- 117 Gao J F, Xiong K N. Evaluation of karst ecosystem service value: A case study of Huajiang Gorge of Guizhou Province (in Chinese). *Trop Geogr*, 2015, 35: 111–119 [高渐飞, 熊康宁. 喀斯特生态系统服务价值评价——以贵州花江示范区为例. *热带地理*, 2015, 35: 111–119]
- 118 Wang J M, Wu S Q, Cui P, et al. Assessment on forest ecosystem service value in Wuma River Basin (in Chinese). *J Guizhou Norm Univ (Nat Sci)*, 2019, 37: 49–55 [汪金梅, 吴松钦, 崔鹏, 等. 五马河流域森林生态系统服务价值评估. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 37: 49–55]
- 119 Li Y Q, Deng O, Li R S, et al. Soil and water conservation and ecological benefits of forest ecosystem in new urban karst areas of central Guizhou Province (in Chinese). *Bull Soil Water Conserv*, 2022, 42: 244–250 [李亦秋, 邓欧, 李若霜, 等. 黔中喀斯特城市新区森林生态系统水土保持及其生态效益. *水土保持通报*, 2022, 42: 244–250]

Summary for “中国喀斯特生态系统健康诊断的方法、进展与展望”

Methods, progress and prospect for diagnosis of karst ecosystem health in China—An overview

Xiaoyong Bai^{1,2,3}, Chen Ran^{1,7}, Jing'an Chen^{1,2}, Guangjie Luo³, Fei Chen⁴, Biqin Xiao⁵, Mingkang Long^{1,7}, Zilin Li⁵, Xiaoyun Zhang⁵, Xiaoqian Shen⁵, Shu Yang⁵, Xinhai Lin⁶, Chaojun Li^{1,7}, Sirui Zhang^{1,7}, Lian Xiong⁵ & Shijie Wang^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

² Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;

³ Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China;

⁴ College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

⁵ School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;

⁶ Forest College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

⁷ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

China is the country with the largest area and widest distribution of carbonate karst, with a population of approximately 200 million and an economic scale of approximately 10% of the country. In particular, the southwest region centered in Guizhou, located at the upper reaches of the Yangtze and Pearl Rivers, is an economically underdeveloped but critical ecological security barrier for the country. Karst landforms are important topological features. Scientific diagnosis of the health of its ecosystem is not only essential for ecological restoration and sustainable development but is also the basic premise for formulating response plans. Although a significant amount of research has been carried out in the past, a lack of systematic and holistic understanding still exists. Based on previous studies, in this paper, we further summarize the evolution and development of karst landforms into six stages: diagenetic, continental, mountain-forming, cluster, forest-forming, and primitive stages. On this basis, we also systematically summarize and detail five aspects: The calculation of weathering and soil-forming rate of carbonate rocks, diagnosis of soil water, evaluation of soil and water loss, interpretation and evolution of rocky desertification, and scientific measurement of ecosystem services. Despite the different research methods of different scholars in different times, the results are very different. However, after comprehensive consideration of the existing research results and the advantages and disadvantages of their application methods, the following conclusions were made. (1) Although the chemical weathering of carbonate rocks is very fast ($30\text{--}130\text{ mm ka}^{-1}$), their soil formation rate is extremely slow due to their low content of acid-insoluble substances (within 5%), generally between $5\text{ and }50\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$. (2) The soil is small and the distribution discontinuous, but the soil water content is relatively high, ranging from $0.2\text{ to }0.4\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$. This may be related to the catchment effect of surrounding bedrock, and it will be dry in the future. (3) The modulus of soil erosion is low, generally between $2\text{ and }200\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$. However, due to steep slope, heavy rainfall, and abrupt contact with rock and soil, the risk of soil erosion is very high, and there is a certain proportion of underground leakage. (4) The evolution of rocky desertification can be divided into three classic types, namely univariant, progressive, and retro-variant, but the method of rocky desertification resolution through decision tree and human-computer interaction is relatively efficient and accurate. (5) The evaluation model of karst ecosystem service function should be based on the soil formation rate to correct the water and soil conservation function and the climate adjustment function based on the karst geological carbon sink. At present, the indicators, methods, and models for diagnosing the health of the karst ecosystem must be improved and innovated to fully reflect the particularity of the karst region and the matching of the model methods, to improve the spatial and temporal resolution of the monitoring data (especially to establish a coupling model of the karst social-ecosystem), to accurately depict the response process of the karst ecosystem to climate change and human activities, and to improve the accuracy and predictability of the diagnostic model. In short, in this paper, we systematically summarize and detail the methods and major progress in diagnosing the health and sustainability of China's karst ecosystem and further propose the future research direction and breakthrough focus from the perspective of “rock soil water stone life”, with a view to providing scientific and technological support for maintaining the ecological security and sustainable development of karst areas.

karst, ecosystem health, carbonate rock, weathering soil formation rate, rocky desertification

doi: [10.1360/TB-2022-1174](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1174)