

赵恬茵, 吴媛媛, 孙连群, 等. 岩溶地区水土漏失的定量研究进展[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 61-70, 108.

DOI: 10.11932/karst20230105

## 岩溶地区水土漏失的定量研究进展

赵恬茵<sup>1</sup>, 吴媛媛<sup>3</sup>, 孙连群<sup>1</sup>, 高长春<sup>1</sup>, 潘网生<sup>1</sup>, 许玉凤<sup>1</sup>, 程富东<sup>2</sup>

(1. 黔南民族师范学院, 贵州 都匀 558000; 2. 黔南州水土保持站, 贵州 都匀 558000;

3. 西安航天宏图信息技术有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 岩溶区特殊的“二元三维”水文地质结构为水土漏失提供了空间条件。水土漏失准确定量一直是岩溶区水土流失研究的重点和难点。以水土漏失的影响因素为核心, 深入分析水土漏失对土壤性质、植被、降雨、地貌和人类活动等环境因子的响应特征, 系统归纳前人采用径流小区监测法、洞穴滴水示踪法、传统模型法和指纹识别技术等方法获得径流小区、洞穴汇水区和流域尺度的水土漏失定量研究成果, 指出水土漏失定量研究存在的主要问题, 探讨水土漏失定量研究发展方向, 为深入分析水土漏失驱动机制和进一步研究水土漏失与环境因子联动耦合关系提供参考。

**关键词:** 岩溶区; 水土漏失; 定量研究; 影响因素

**中图分类号:** S157 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810(2023)01-0061-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### 0 引言

岩溶区脆弱的生态系统与不合理人类活动加剧了岩溶区生态环境问题。目前世界上岩溶面积占全球陆地面积的12%, 中国岩溶面积占国土面积30%以上, 主要分布在中国西南地区, 尤其以云贵高原最为集中<sup>[1]</sup>。云贵高原是岩溶成片连续分布最广、地貌类型最多、生态环境最脆弱, 极易形成石漠化的世界最典型的亚热带岩溶区, 与欧洲地中海沿岸岩溶区和美国东部岩溶区并称世界三大岩溶区<sup>[2-3]</sup>。我国西南岩溶区地形破碎且雨热同季、暴雨频发。西南岩溶区为地表—地下“二元”水文地质结构<sup>[4]</sup>, 存在地表水土流失和地下水漏失现象<sup>[4-7]</sup>。确定水土漏失量一直是岩溶区土壤侵蚀研究的重点和难点问题。水土

漏失是指岩溶区上覆土壤在外力作用下不断填充地下裂隙、孔洞和洞穴等地下管道, 形成的土壤剥离, 后随重力、水力等外营力的垂直作用, 在地下管道内向下迁移并发生沉积的事件<sup>[8]</sup>。就水土漏失的侵蚀—输移过程而言, 水土漏失是地表土壤向在岩溶作用和流水管道侵蚀作用下形成的地下管道系统中沉降的结果; 就侵蚀过程的作用力而言, 水土漏失是在重力、水力等外营力共同作用下发生的地表土壤填充地下管道。基于强烈岩溶作用, 岩溶区地下管道发育, 为水土漏失提供复杂漏失路径。不同于地表水土流失的土壤地表空间的输移和沉积, 水土漏失是土壤由地表向地下双层空间的输移和沉积, 导致水土漏失量准确定量监测困难重重<sup>[8-10]</sup>, 目前水土漏失定量研究工作主要从以下三个方面开展: 一是以径流小区为

基金项目: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金课题(A314021402-202113); 贵州省普通高等学校青年科技人才基金项目(黔教合 KY 字 [2019]210, 黔教合 KY 字 [2018]437); 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础 [2018]1145); 黔南景区溶洞旅游资源开发与生态环境保护工程研究中心(黔教合 KY 字 [2017] 025); 黔南民族师范学院校级项目(qnsyrc201816, qnsy2018033)

第一作者简介: 赵恬茵(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀方面研究。E-mail: zhaotianyin1988@126.com。

通信作者: 程富东(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土流失监测及喀斯特区域生态系统恢复与重建方面研究。E-mail: 330661090@qq.com。

收稿日期: 2021-05-17

监测对象,利用漏失水沙数据直观获取水土漏失量<sup>[11-17]</sup>;二是以岩溶洞穴滴水泥沙为监测对象,利用滴水示踪法获取洞穴汇水区水土漏失量<sup>[18-20]</sup>;三是以流域为监测对象,利用数学模型获取水土漏失量<sup>[21-25]</sup>。三种方法的研究成果中,部分研究显示水土漏失量占水土流失量较大比例<sup>[11-16,18]</sup>,另一部分研究认为水土漏失作用微弱<sup>[19,21-25]</sup>,占水土流失比重较小。研究结果差异较大的原因在于岩溶地区地表和地下环境空间分布具有较大差异,不同监测尺度的监测结果不具可比性。基于此,本文在总结归纳岩溶区水土漏失定量研究的各类方法和成果基础上,指出岩溶区水土漏失定量研究存在的问题,以期对水土漏失定量监测、深化认识岩溶区土壤侵蚀规律、评价现有水土漏失治理措施和有效防治水土漏失提供科学依据。

## 1 水土漏失影响因素

### 1.1 上覆土壤性质对水土漏失的影响

岩溶区水土漏失机理研究中,大量研究成果集中在阐明土壤理化性质对水土漏失的响应<sup>[26-33]</sup>。上覆土壤团聚体<sup>[27]</sup>、颗粒组成<sup>[27-32]</sup>等物理性质和土壤养分元素<sup>[33-36]</sup>、金属元素<sup>[30,34]</sup>等化学性质在一定程度上影响着土壤漏失。唐益群<sup>[27]</sup>指出上覆土壤团聚体崩解成的颗粒越细小,越容易随降雨入渗发生漏失,且指出团聚体崩解程度与其初始含水量和干湿循环次数呈显著负相关关系。研究发现溶洞孔隙内填积的黏土在流水的浸润软化下呈可塑、软塑甚至流塑状是导致地表土壤漏失的主要因素<sup>[18,27-29]</sup>。通过对比分析漏失土壤和地表土壤的颗粒组成,发现漏失土壤黏粒(粒径 $<0.001\text{ mm}$ )含量远高于地表,且漏失土黏粒含量越高,水土漏失程度越高<sup>[30-31]</sup>。李渊<sup>[30]</sup>研究发现洞穴漏失土 pH 及金属元素含量(Mg、Ca、Sr)均高于地表,且土壤 pH 与区域石漠化程度及水土漏失程度呈正相关关系。袁红等<sup>[34]</sup>通过分析坡地不同侵蚀位置土壤剖面的 Mg、Cu、Zn、Mo、Mn 等元素和土壤基本养分元素分布特征,推导出岩溶坡地土壤侵蚀存在地表流失和地下流失,且岩溶坡地从距坡顶 15 m 处开始,土壤漏失加剧。

### 1.2 植被对水土漏失的影响

植被作为指示水土流失发生、发展的重要因子,同时能很好地控制水土流失,科研工作者广泛关注植被对漏失的影响,该类研究主要集中在植被根系

的网固作用<sup>[37-40]</sup>和植被的降雨拦截作用对漏失的影响<sup>[40-42]</sup>以及土壤孢粉对土壤漏失的响应研究<sup>[43]</sup>。研究表明<sup>[37-42]</sup>植被稀少的岩溶区漏失更严重。解明曙<sup>[39]</sup>发现植被根系能提高土壤抗蚀性,减少土壤漏失的发生。石金燕等<sup>[40]</sup>发现林木砍伐后,根系腐败,网固作用减弱,土壤漏失速率加快。孔洁<sup>[42]</sup>在研究不同土地利用类型下水土漏失比例时发现,植被覆盖度最高的灌草地水土漏失比例远小于植被覆盖最低的坡耕地。Gosden Ms<sup>[43]</sup>通过对比岩溶沼泽和相邻非岩溶沼泽土壤中的孢粉序列发现,岩溶水土漏失导致岩溶沼泽孢粉存在明显缺失。

### 1.3 降雨对水土漏失的影响

降雨作为土壤侵蚀发生、发展的原动力,直接影响土壤侵蚀量。杨长春<sup>[44]</sup>指出降雨形成的地下管隙径流流动会带走土壤,造成土壤漏失现象。岩溶区大部分降雨地表径流系数小于 10%<sup>[12-17]</sup>,即岩溶区地表产流降雨事件中 90% 及以上降雨量通过入渗进入地下空间形成地下径流。研究表明降雨强度、降雨历时和降雨量显著影响着水土漏失。西南岩溶区降雨频发,年降雨量高,由于岩溶区地下管道发育,多数降雨较难形成地表径流<sup>[28]</sup>,岩溶区地表产流所需降雨量远大于非岩溶区<sup>[45]</sup>,岩溶区降雨主要通过地下管道进入地下河<sup>[2,8-9]</sup>,降雨对水土漏失的影响主要表现在特定降雨事件下是否形成地表径流,岳坤前<sup>[18]</sup>通过比较岩溶区逐月降雨量和逐月水土漏失量发现水土漏失对降雨量响应十分明显,且土壤漏失量随着降雨量季节性增加而增加。周永华<sup>[46]</sup>研究发现当次降雨量大于 10 mm 时,随着次降雨量增加,水土漏失量明显增加,当次降雨量小于 10 mm 时,降雨量对水土漏失量的影响不明显。大量研究<sup>[11-17]</sup>表明当降雨强度小于  $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时,岩溶区水土流失以漏失为主,地表几乎不产流,当降雨强度大于  $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时,地表开始产流,出现地表水土流失,当降雨强度大于  $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时,水土流失以地表流失为主。胡奕等<sup>[47]</sup>发现岩溶区地表径流与降雨强度呈显著正相关,与地下孔(裂)隙度、岩石裸露率均呈显著负相关;地下径流与降雨强度、地下孔(裂)隙度和岩石裸露率的变化均呈正相关。杨智等<sup>[48]</sup>发现岩溶区地下径流与降雨历时呈负相关。

### 1.4 地貌特征对水土漏失的影响

岩溶地区褶皱、断裂和节理纵横交错,岩体结构

破碎,导致裂隙、孔隙等管道发育<sup>[27]</sup>。岩溶地区基岩出露率高,特有的地表—地下“二元三维”结构<sup>[4]</sup>造成的降雨径流在地表和地下的分配和运行过程直接影响土壤流失定量结果。由于大部分降雨在地表无法产生连续径流,以至于地表水土流失在坡面上并不连续,地表径流并不能长距离搬运地表土壤,剥离的土壤在地表只能进行渐进式短距离迁移<sup>[49]</sup>。加之,岩溶区以碳酸盐岩为主,在酸性条件下极易发生化学溶蚀,大气降水溶解一定量CO<sub>2</sub>对碳酸盐岩具有较强溶蚀作用,土壤中存在的由生物作用产生的有机酸,增加降水对碳酸盐岩溶蚀作用。基于此岩溶区岩石风化成土后,大部分土壤向岩溶裂隙和洞穴等溶蚀凹地集中,一旦沉积,不易被地表径流搬运冲刷,最终以漏失方式向地下管道系统流失。罗为群等<sup>[50]</sup>通过研究岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤侵蚀分布特征发现岩溶坡面上从山峰顶部经峰坡中部沿缓坡部位到坡麓部位土壤流失均以漏失为主,占总流失量65%~96%,洼地底部土层淤积较厚,主要以地表流失为主,占总流失量61%。

### 1.5 人类活动对水土流失的影响

人类活动主要通过改变地表环境和土体结构影响水土流失<sup>[9,28,51-55]</sup>。苏维词<sup>[51]</sup>认为岩溶区人口快速增长、土地过度开垦及森林植被大面积砍伐等人类活动,造成岩溶区石漠化和水土流失。张信宝等<sup>[28]</sup>研究发现岩溶区诸如农业耕作、森林砍伐以及过度放牧等人类活动在改变土体物理结构同时,减少地表植被覆盖度,破坏植被根系网固作用,增加降雨下渗量,促进上覆土壤向岩溶空隙和岩溶孔洞中迁移,加剧地下漏失和土地石漠化发展。蒋忠诚等<sup>[9]</sup>发现人为扰动越大的土地利用类型更容易发生水土流失,且农耕活动加剧岩溶区坡地特别是缓坡部位水土流失。魏兴萍等<sup>[52]</sup>发现岩溶地区水土漏失主要发生在石漠化等级高和人类活动干扰强的区域。大量研究<sup>[51-55]</sup>表明人类活动能促进岩溶区石漠化发展,而石漠化程度越高,地表水土流失减弱,地下水土漏失增强。

## 2 水土流失量的确定

### 2.1 径流小区水土流失量的确定

径流小区作为经典的侵蚀监测工具,是研究土

壤侵蚀发生、发展规律的基本单元,在岩溶区水土漏失研究中得到广泛应用。岩溶区径流小区水土漏失量确定可分为室内模拟和室外径流观测场确定漏失量。

(1) 室内模拟降雨径流小区法水土漏失量,用于室内模拟降雨水土漏失试验的径流小区多以长4 m,宽1.5 m,深35 cm,且底板均匀打孔(可调节孔隙度)的钢槽建成,并设有地表、地下集流槽,通过监测次降雨径流小区地表、地下产沙量和产流量,定量分析水土漏失特征<sup>[11-17]</sup>。研究显示,室内径流小区监测的水土漏失量结果并不理想,同样降雨和土壤条件下漏失量相差较大,且影响因素主次关系差异较大。这与岩溶区复杂的地表和地下“二元”结构的不可完全模拟性有关,岩溶区水土漏失同时受到土壤、植被、岩性、基岩裸露率等地表因子和雨强、雨型等气象因素以及地下孔隙大小、分布等地质因子影响,而径流小区面积小,结构简单,土壤漏失的地上、地下路径失真,导致径流小区地上、地下产沙对降雨的响应敏感性增大。因此,虽然通过径流小区可以直观获取地上水土流失量和地下漏失量,并为深入研究影响水土漏失的环境因子提供条件,但由于径流小区在岩溶区水土流失研究应用中的局限性,使得径流小区研究结果仅能作为参考,并不能真实反映自然条件下岩溶区地上水土流失和地下水土漏失特征。

(2) 室外径流观测场水土漏失量,可通过室外径流观测场直接获取地表水土流失量<sup>[40]</sup>,再基于三维激光扫描技术、划痕法和测钎法等方法获取径流场地表和地下总侵蚀量<sup>[56]</sup>,从而得到径流场水土漏失量。石燕金<sup>[40]</sup>在研究岩溶区皆伐样地和相邻径流场地上、地下侵蚀特征时,基于测钎法和径流观测场法得到岩溶坡面土壤侵蚀模数,分别是 $2\ 066.7\ \text{t}\cdot\text{km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.78\ \text{t}\cdot\text{km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 。得到岩溶区皆伐样地以水土漏失为主。值得注意的是划痕法等土壤侵蚀监测方法是对土壤侵蚀发生的原位监测,不能反映侵蚀的运移沉积特征,获取的总侵蚀量一般大于实际侵蚀量<sup>[56]</sup>,导致基于室外径流观测场获取的水土漏失量大于实际漏失量。

### 2.2 岩溶洞穴汇水区水土流失量的确定

洞穴汇水区漏失土壤最终进入洞穴并沉积,岩溶洞穴作为能直接进出的相对封闭的地下空间,为直接监测水土漏失,深入研究水土漏失机理提供了



可能。岩溶洞穴汇水区上覆土壤通过漏失进入洞穴,在洞穴中不断迁移沉积,赋予洞穴沉积物特殊的学术价值。洞穴汇水区上覆土壤主要通过三种方式进入洞穴:其一,在地表水流冲刷作用下,洞口土壤直接进入洞穴;其二,洞穴上覆土壤随重力水或毛细水沿裂隙、孔洞等向着洞穴入渗通过洞穴岩板进入洞穴形成滴水沉积;其三,地下河水径流泥沙在洞穴中发生沉积。大气降水直接作用于岩溶上覆土壤,随后在重力作用下渗入岩层,再以分散渗流的形式进入洞穴体系中的岩层毛细孔隙及岩层裂隙,最终在洞顶岩板上渗出形成洞穴滴水。洞穴土壤漏失量定量研究还处于起步阶段,前人采用洞穴滴水示踪法,通过测定累年滴水泥沙量,得到洞穴汇水区水土漏失量<sup>[29]</sup>,但此类研究主要测定随重力水或毛细水入渗进入洞穴的水土漏失量,忽略了通过流水冲刷及地下河水径流泥沙沉积进入洞穴的漏失量。洞穴滴水示踪测定水土漏失量的难点在于洞穴滴水汇水面积与滴水漏失占总漏失量的比重的确定。目前洞穴滴水汇水面积多用水力联系示踪试验确定,主要方法有利用荧光标记及自旋标记示踪剂确定洞穴滴水汇水面积<sup>[55]</sup>。李渊等<sup>[30]</sup>通过研究贵州石漠化地区3个岩溶洞穴滴水特征,得到石漠化等级越高,洞穴滴水频率越高,相比地表水土流失,水土漏失比例越高。岳坤前<sup>[18]</sup>通过连续监测1个水文年内岩溶区三种地貌类型(岩溶区高原山地、高原峡谷和高原盆地)和不同石漠化等级(轻度、中度、强度和极强度)的7个洞穴滴水漏失特征,得到各岩溶洞穴侵蚀模数。同样得到洞穴汇水区水土漏失随石漠化等级增大而增大。

### 2.3 流域水土漏失量的确定

基于复杂的地下管道系统,岩溶区流域一般为非闭合流域,即地下分水线和地表分水线不重合。这给岩溶区水土漏失定量监测研究带来较大挑战。目前针对流域尺度的地下漏失定量研究一般选取闭合度较高流域,如岩溶洼地,为研究对象,基于各类技术手段和监测方法获取地表水土流失量和地下水水土漏失量。流域尺度范围内水土漏失量的确定主要通过直接监测法、模型法和指纹识别法开展。直接监测法一般是在流域地下河出口断面进行定点监测,通过水沙资料分析,获取流域水土漏失量。李晋等<sup>[57]</sup>通过对贵州清镇王家寨小流域地下河出口断面

水沙监测,得到该流域地下土壤侵蚀模数为  $0.42 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,占流域侵蚀总量的0.8%。模型法估算水土漏失量的基本原理是建立水土漏失量及其主要影响因子间的函数关系,通过监测各影响因子获取漏失量。最常用的模型是基于流域与地上、地下侵蚀量平衡原则,漏失量模型法基本形式如下<sup>[9]</sup>:

$$E_d = E - E_u \quad (1)$$

式中: $E$ 为流域水土流失总量; $E_u$ 为流域地表水土流失量; $E_d$ 为流域水土漏失量。

蒋忠诚等<sup>[9]</sup>利用植被覆盖度、流域表层土壤侵蚀厚度以及地表径流水沙数据,得到峰丛洼地水土漏失模型:

$$E_d = \left( \sum_{i=1}^n (h_{i2} - h_{i1}) / n \times (P_1 + P_2) / 2 \times A \times \rho \right) - Q \times S / a \quad (2)$$

式中: $E_d$ 为土壤水土漏失量; $P_1$ 、 $P_2$ 为侵蚀前后的土被覆盖率; $h_{i2}$ 、 $h_{i1}$ 为侵蚀前后流域*i*点土壤厚度; $A$ 为流域面积; $\rho$ 为流域土壤密度; $n$ 为监测点数; $Q$ 为地表径流量; $S$ 为地表径流含沙量; $a$ 为流域泥沙输移比。

该模型模拟的漏失量与实际漏失量存在一定差异,在于该模型是基于划痕法直接获取土壤地下和地表总侵蚀量,利用地表径流泥沙得到地表侵蚀量。孔洁<sup>[42]</sup>将漏失量分为地下沉积量和地下输沙量细化模型1,具体模型如下:

$$E_s = E - E_u - E_t \quad (3)$$

式中: $E_s$ 为水土漏失量的年地下沉积量; $E_t$ 为地下径流年输沙量。

该模型特点是将水土漏失划分成地下沉积量和地下径流输沙量,总侵蚀量同样利用定点监测手段获取,对于地下径流输沙量,只能在地下径流出露的地方进行定点连续监测。对于传统模型法,无论是地表还是地下水流失的定点观测其点位选择直接影响监测结果。其次,此类模型的总侵蚀量定点监测只关注泥沙原位剥离,未考虑泥沙运移和异地沉积过程,降低模拟准确性。此外,传统模型法是基于总侵蚀量的定点监测和地表侵蚀量的地表径流监测以及地下输沙量的地下径流监测模拟水土漏失量,很大程度上受到流域土壤侵蚀空间分布、水文响应单元的地理空间分异以及监测成本等因素限制,使得传统模型只适用于较小尺度水土漏失量的确定。

针对各尺度水土漏失的定量研究,科研工作者

引入指纹识别技术<sup>[22-25]</sup>。指纹识别技术多用于泥沙来源定量研究,在黄土高原流域泥沙来源的研究中得到广泛应用<sup>[58]</sup>。指纹识别技术是在划分潜在物源地基础上,采集潜在物源土壤样本和流域出口泥沙样,基于最佳指纹识别因子组合,利用数值转换模型将潜在物源地土壤样本和泥沙样的最佳指纹因子组合浓度转换为各潜在物源的相对产沙比例<sup>[58]</sup>。指纹识别法判定泥沙来源的前提是流域不同泥沙源地间土壤指纹因子存在显著差异<sup>[59-60]</sup>。岩溶区小流域地下空间发育,且地表、地下土壤理化性质具有显著差异<sup>[27-31]</sup>,这正是利用指纹识别技术判定泥沙来源的基础。指纹识别技术判定岩溶区水土流失,可以通过获取河流泥沙和流域不同土地利用类型(农耕地、草地、林地等)、不同地貌类型(正地貌、负地貌等)以及土壤剖面不同位置土壤,通过室内分析泥沙和流域土壤物理化学和生物性质,利用数值转换模型得到河流泥沙地上和地下产沙比例,结合水沙资料获取地表流失量和水土流失量。数值转换模型基本形式如下所示(公式4,公式5)<sup>[58]</sup>:

$$C_{si} = \sum_{j=1}^k P_j C_{ji} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m P_j = 1 \quad 0 \leq P_j \leq 1 \quad (5)$$

式中:  $C_{si}$  为泥沙指纹因子  $i$  的浓度;  $P_j$  为泥沙来源地  $j$  的产沙比例;  $C_{ji}$  为泥沙来源地  $j$  指纹因子  $i$  的平均浓度;  $m$  为泥沙来源地的数量;  $k$  为指纹因子数量。

利用最小二乘法,即基于泥沙指纹因子浓度实测值与利用模型模拟值的相对误差平方和(Res)最小,完善数值转换模型,其形式如下:

$$Res = \sum_{i=1}^k \left( \frac{C_{si} - \sum_{j=1}^m P_j C_{ji}}{C_{si}} \right)^2 \quad (6)$$

指纹识别技术用于研究岩溶区泥沙来源,对于判别地表和地下水流失研究具有重大意义<sup>[22-25]</sup>。流域尺度内,针对有明确的地下和地表径流出口的流域,基于指纹识别技术可实现岩溶区不同地貌类型、不同土地利用类型和不同深度土壤的水土流失量和地表流失量定量研究,结合流域水沙资料为深入研究水土流失机理提供数据支撑和理论基础;对于没有地下径流出口的流域,可以通过获取河流淤积泥沙或者次降雨河流悬浮泥沙,结合河流水沙资料,判定较长时间尺度和次降雨时间尺度流域地上

水土流失量和地下水流失量<sup>[62]</sup>。程倩云等<sup>[22]</sup>基于<sup>137</sup>Cs和磁化率双指纹示踪技术得到西南岩溶区陈旗小流域地下河流细颗粒泥沙37.9%来自深层土壤,62.1%来自岩溶孔隙,而表层土壤的水土流失贡献率不到0.1%。

### 3 不足与展望

岩溶区水土流失受到地表土壤与植被、地下岩石与管道系统以及地上大气降水和人类活动等多元因素的综合影响,导致水土流失对不同地表—地下环境的响应存在多解性。不同时空尺度、不同方法下的水土流失特征研究要针对土壤-基岩环境以及水土流失的水文过程进行具体分析。现有的水土流失定量研究方法有各自的优越性和局限性,室内模拟径流小区法通过人工模拟岩溶区地下孔隙系统,在较小时空尺度内能快速直观监测径流场水土流失量,但其监测结果对降雨、土壤理化性质等外界环境因子敏感度高,结果不理想;径流观测场实现获取野外坡面尺度地下漏失数据,然而,也存在总侵蚀量获取不准确等问题;洞穴滴水法仅示踪通过滴洞穴水方式发生的水土流失量,与洞穴汇水区实际漏失量相差较大,但作为新的地下漏失研究方法为地下漏失监测提供新思路;流域尺度水土流失量的确定主要有直接监测法、模型法和指纹识别法。直接监测法、模型法可直接监测流域尺度地下漏失量,但在实际操作中存在一定局限性。首先,直接监测法和传统模型法对流域水文条件要求较高,直接监测法要求流域要有明确的地下径流出口,且地下径流与地表径流间不发生交换叠加;其二,流域必须是闭合流域,即流域地表、地下产流产沙均只发生在流域内部,不被其他流域干扰;其三,直接监测法和模型法均需要定点监测地下或地表径流输沙量,径流输沙量的监测精度受到监测点位、监测时间影响较大。指纹识别技术在一定程度上解决了直接监测法和模型法的一些问题,但其本身存在一些局限性如泥沙来源地的选择、指纹因子的筛选和保持性校正等问题<sup>[58-62]</sup>,此外指纹识别技术在判定地表水土流失和水土流失时存在较多干扰因素:其一,我们不能确定是否各土地利用类型的土壤表层至底层均发生水土流失,必然存在水土流失判定过程中的漏失泥沙来源地数量增加现象,源地数量增加对判定结果影响较

大<sup>[58,62]</sup>;其次,岩溶区大部分降雨不产生地表径流,在流域尺度内不能明确哪些土地利用类型或地貌类型地表土壤会发生土壤侵蚀产沙同样对地表水土流失泥沙来源地的数量判定有影响;其三,指纹识别技术判定水土流失同样存在定点监测河流水沙资料的问题。综上,径流小区法通过人工凿孔模拟地下孔隙,定量结果只能作为参考;洞穴尺度内的滴水示踪法只考虑以滴水沉积的水土流失,定量结果远小于实际结果;直接监测法和模型法对流域的选择要求严苛;指纹识别技术存在一定局限性且同样需要定点监测地下河或地表河水沙过程。

水土流失路径复杂性和多变性、岩溶区地下水文过程的多界面性以及水土流失影响因子的多元性和交互性等问题致使地下漏失定量研究成为难点,今后关于岩溶区水土流失定量研究需注意以下几点:

(1)水土流失监测技术。岩溶区山高坡陡、地表破碎、地下空间复杂多变具有隐秘性和危险性,很大程度上阻碍水土流失监测。目前地下空间结构并不清楚,亟需探究科学有效的水土流失监测方法。可通过结合室内模拟实验数据和野外实地调查数据获取地下漏失占总流失量比例,为水土流失定量研究提供数据支撑;

(2)水土流失定量研究的尺度效应。岩溶区地上-地下的垂向空间性和多界面性,致使水土流失的水文驱动机制十分复杂,岩溶区土壤因子、植被因子、地貌因子以及孔隙因子等自然因子和人类活动因子的空间异质性是岩溶区水土流失的尺度效应形成的主要原因,水土流失的尺度效应直接导致在岩溶区建立的水土流失经验模型并不理想。已有的不同尺度范围水土流失定量研究方法可知径流小区法的水土流失是指径流小区地下集流槽中泥沙沉积量;洞穴滴水示踪法判定的水土流失量为洞穴汇水区从地表以滴水方式进入洞穴的泥沙沉积量;直接监测法和指纹识别技术获取的流域水土流失量是流域出口地下径流输沙量;模型法获取的流域水土流失量是流域各点土壤发生向下迁移的累积输移量,数值上等于流域各处发生原位土壤侵蚀量之和减去地表径流输沙量。综合各类研究不难发现,不同尺度范围内界定的水土流失量存在差异。对于流域尺度内,一部分界定的水土流失量是流域地下产沙量,一部分界定的水土流失量是流域地下侵蚀量;径流小区尺度界定的水土流失量是小区地下径流产沙量;洞

穴尺度界定的水土流失量是洞穴汇水区洞穴滴水产沙量;指纹识别技术在各空间尺度内界定的水土流失量均为地下产沙量。水土流失量不同界定直接影响监测结果。导致地下漏失量尺度转换成为难点。因此当前需要进一步挖掘不同尺度范围准确定量水土流失方法,通过引入校正系数等方法,统一界定各尺度范围地下漏失量,为水土流失尺度转换奠定基础;

(3)漏失泥沙来源问题。指纹识别技术在判定漏失量的同时,既能用于研究流域地表-地下土壤侵蚀的时空分布特征,也能为确定不同深度土壤漏失强度提供依据。应注意的是判定不同土地利用类型或地貌类型土壤属性指标(相同深度和不同深度)是否具有显著差异时,也应明确不同深度土壤属性指标在流域空间上是否具有显著差异,从而判定不同深度土壤是否可以作为潜在泥沙源地,不仅为定量和定性研究漏失泥沙来源的土壤剖面垂向空间分布特征提供可能,也为研究不同漏失界面的水土流失特征提供数据支撑;

(4)不同漏失界面产流机制及其对地下漏失的影响。表层土壤在漏失过程中经历了气土界面—土石界面—石气界面—气水界面。不同界面所处物理化学环境差异显著,导致产流机制存在较大差异,这直接影响水土流失和地表水土流失。基于指纹识别技术,结合不同界面土壤的漏失贡献率,在不同尺度范围内不同产流条件下分析岩溶区不同漏失界面产流机制及其对水土流失的影响,为深入研究水土流失机理提供理论依据,同时为建立水土流失预报模型和防治水土流失提供参考;

(5)水土流失量解译地表侵蚀环境演变。漏失泥沙来源于特定地表-地下环境下的土壤向下输移沉积,且漏失过程受到地表环境因子如土壤物理化学性质、植被、气候和人类活动等和地下环境因子如裂隙、孔洞等共同影响,因此,水土流失沉积泥沙赋存大量流域地表-地下侵蚀环境演变信息。加强漏失沉积泥沙的物理化学及生物性质对环境变化的响应研究,以解译地表-地下侵蚀环境演变信息,为定量研究不同环境条件下水土流失变化特征提供数据支撑,并为岩溶区石漠化有效治理提供参考。

## 参考文献

- [1] 刘拓,周光辉,但新球,杨维西,熊智平.中国岩溶石漠化:现



- 状,成因与防治[M].北京:中国林业出版社,2009.
- LIU Tuo, ZHOU Guanghui, DAN Xinqiu, YANG Weixi, XIONG Zhiping. Karst rocky desertification in China: Current situation, causes and prevention[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009.
- [2] 杨杨, 赵良杰, 潘晓东, 夏日元, 曹建文. 西南岩溶山区地下水资源评价方法对比研究: 以寨底地下河流域为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 111-123.
- YANG Yang, ZHAO Liangjie, PAN Xiaodong, XIA Riyuan, CAO Jianwen. Comparative study on evaluation methods of groundwater resources in karst area of Southwest China: Taking Zhaidi underground river basin as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 111-123.
- [3] WU Qinglin, LIANG Hong, XIONG Kangning, LI Rui. Eco-benefits coupling of agroforestry and soil and water conservation under KRD environment: Frontier theories and outlook[J]. *Agroforestry Systems*, 2019, 93(5): 1927-1938.
- [4] 杨明德. 论贵州岩溶水赋存的地貌规律性[J]. 中国岩溶, 1982, 1(2): 81-91.
- YANG Mingde. The geomorphological regularities of karst water occurrences in Guizhou Plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 1982, 1(2): 81-91.
- [5] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 王克林, 孟天友, 白晓永. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.
- ZHANG Xinbao, WANG Shijie, CAO Jianhua, WANG Kelin, MENG Tianyou, BAI Xiaoyong. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 274-279.
- [6] AN Jiping, WANG Ji, CAI Xiongfei, DUAN Zhibin, YAN Mengmeng. Research progress of soil loss in karst areas under the dual structure of Southwest China[J]. *Agricultural Science & Technology* 2017, 18(8): 1452-1458.
- [7] 闫钺全, 刘琦, 邓大鹏, 王涵. 表层岩溶裂隙带土壤地表流失/地下漏失室内模拟实验[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 240-248.
- YAN Yiquan, LIU Qi, DENG Dapeng, WANG Han. Laboratory simulation study on soil surface loss and underground leakage in the epikarst fissure zone[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 240-248.
- [8] 张信宝, 王世杰. 浅议喀斯特流域土壤地下漏失的界定[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 602-603.
- ZHANG Xinbao, WANG Shijie. A discussion on the definition of soil leaking in a karst catchment[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 602-603.
- [9] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 曹建华, 覃星铭, 李衍青, 杨奇勇. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.
- JIANG Zhongcheng, LUO Wei-qun, DENG Yan, CAO Jianhua, QIN Xingming, LI Yanqing, YANG Qiyong. The leakage of water and soil in the karst peak cluster depression and its prevention and treatment[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(5): 535-542.
- [10] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 容丽, 杨涛, 陈波, 汪进阳. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 125-129.
- PENG Tao, WANG Shijie, ZHANG Xinbao, RONG Li, YANG Tao, CHEN Bo, WANG Jinyang. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for karst slopes[J]. *Earth and Environment*, 2008, 36(2): 125-129.
- [11] DAI Quanhou, LIU Zhengtang, SHAO Hongbo, YANG Zhi. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 985-995.
- [12] 刘正堂, 戴全厚, 杨智. 喀斯特裸坡土壤侵蚀模拟研究[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 356-362.
- LIU Zhengtang, DAI Quanhou, YANG Zhi. Study of simulated soil erosion on a bare karst slope[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(3): 356-362.
- [13] 吴夏懿, 张志才. 贵州省岩溶地区年径流系数受下垫面影响的分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(5): 6-9.
- WU Xiayi, ZHANG Zhicai. Analysis of annual runoff coefficient variation and influenced by catchment properties in Guizhou Province[J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(5): 6-9.
- [14] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 李燕. 喀斯特坡地土壤地下侵蚀模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 7-13.
- YAN Youjin, DAI Quanhou, FU Wenbin, LI Yan. Experimental study on simulation of underground soil erosion in karst slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 7-13.
- [15] DAI Quanhou, PENG Xudong, ZHAO Longshan, SHAO Hongbo, YANG Zhi. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(7): 1922-1930.
- [16] DAI Quanhou, PENG Xudong, WANG Peijiang, LI Changlan, SHAO Hongbo. Surface erosion and underground leakage of yellow soil on slopes in karst regions of Southwest China[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(8): 2438-2448.
- [17] YAN Youjin, DAI Quanhou, YUAN Yingfei, PENG Xudong, ZHAO Longshan, YANG Jing. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. *Geoderma*, 2018, 330(1): 30-40.
- [18] 岳坤前. 中国南方典型石漠化区地下水流失防治技术初步研究与示范[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- YUE Kunqian. Prevention technology demonstration of subterranean soil erosion in the typical rocky desertification area of South China karst[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.
- [19] 秦旭梅. 模拟研究喀斯特地区不同地表作物覆盖下水土流失特征[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017.
- QIN Xumei. A simulation study of the characteristics of soil and water loss under different surface crops in karst region[D]. Chongqing: College of Geography and Tourism, 2017.

- [20] 殷建军, 郭小娇, 姜光辉, 郭芳, 唐伟, 汤庆佳, 刘绍华. 桂林硝盐洞洞穴滴水示踪及气候环境意义研究[J]. *水文*, 2017, 37(4): 18-23.  
YIN Jianjun, GUO Xiaojiao, JIANG Guanghui, GUO Fang, TANG Wei, TANG Qingjia, LIU Shaohua. Tracer test of drip water in Xiaoyan cave, Guilin and its climatic and environmental significance[J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(4): 18-23.
- [21] 魏兴萍. 岩溶槽谷区水土流失特征及机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.  
WEI Xingping. The study on the characteristics and mechanism of soil erosion in karst valley area, Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [22] 程倩云, 彭韬, 张信宝, 曹乐, 王世杰. 西南喀斯特小流域地表、地下河流细粒泥沙来源的<sup>137</sup>Cs和磁化率双指纹示踪研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 140-145.  
CHENG Qianyun, PENG Tao, ZHANG Xinbao, CAO Le, WANG Shijie. Tracing fine sediment sources in the surface and subsurface rivers of a karst watershed using compound fingerprinting with <sup>137</sup>Cs and magnetic susceptibility in Southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 140-145.
- [23] 刘雪枚. 基于岩性差异的喀斯特区水土流失特征研究: 以三岔河流域为例[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.  
LIU Xuemei. Study on characteristics of soil and water loss based on lithological difference in karst area: A case study of the catchment of Sanchahe area[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019.
- [24] ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong, LIU Xiuming. Application of a <sup>137</sup>Cs fingerprinting technique for interpreting responses of sediment deposition of a karst depression to deforestation in the Guizhou Plateau, China[J]. *Science China*, 2011(3): 431-437.
- [25] 雷珊, 魏兴萍. 复合指纹法定量示踪西南岩溶洼地小流域泥沙来源[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(144): 48-53.  
LEI Shan, WEI Xingping. Quantitative tracing of sediment sources in small watersheds in southwestern karst depressions by composite fingerprinting[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(144): 48-53.
- [26] 岳坤前, 顾再柯, 李瑞. 喀斯特石漠化地区地下水土流失研究进展与展望[J]. *中国水土保持*, 2015(5): 58-61.  
YUE Kunqian, GU Zaike, LI Rui. Research progress and prospect of soil erosion in karst rocky desertification area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(5): 58-61.
- [27] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 余恬钰, 杨坪, 王建秀. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究: 以贵州普定县陈旗小流域为例[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(2): 121-127.  
TANG Yiqun, ZHANG Xiaohui, ZHOU Jie, SHE Tianyu, YANG Ping, WANG Jianxiu. The mechanism of underground leakage of soil in karst rocky desertification areas: A case in Chenqi small watershed, Puding, Guizhou Province[J]. *Carso-logica Sinica*, 2010, 29(2): 121-127.
- [28] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 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[J]. *地球与环境*, 2007, 35(3): 202-206.  
ZHANG Xinbao, WANG Shijie, HE Xiubin, WANG Yangchun, HE Yongbing. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes[J]. *Earth and Environment*, 2007, 35(3): 202-206.
- [29] 周春衡, 陈洪松, 付智勇, 任惠敏, 兰秀. 土壤大孔隙形态对喀斯特区水土漏失过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 70-76.  
ZHOU Chunheng, CHEN Hongsong, FU Zhiyong, REN Huimin, LAN Xiu. Effect of soil macropore structures on soil and water loss progress in karst areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 70-76.
- [30] 李渊, 刘子琦, 吕小溪, 曹洋, 董晓超. 贵州石漠化地区地下漏失水土理化性质特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 111-117.  
LI Yuan, LIU Ziqi, LV Xiaoxi, CAO Yang, DONG Xiaochao. Physicochemical properties of underground leakage water and soil in rocky desertification area of Guizhou, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6): 111-117.
- [31] 李晋, 熊康宁. 岩溶洞穴土壤颗粒分析及其对水土流失的研究意义[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(2): 16-18.  
LI Jin, XIONG Kangning. Particle analysis of soil in karst caves and its significance for water and soil erosion[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2011, 29(2): 16-18.
- [32] 罗小杰, 罗程. 岩溶地面塌陷三机理理论及其应用[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 171-188.  
LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three-Mechanism Theory (TMT) of karst ground collapse and its application[J]. *Carso-logica Sinica*, 2021, 40(2): 171-188.
- [33] 杨宇琼, 戴全厚, 李昌兰, 彭旭东, 严友进. 模拟降雨条件下喀斯特坡耕地氮磷元素地下漏失特征[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(3): 62-70.  
YANG Yuqiong, DAI Quanhou, LI Changlan, PENG Xudong, YAN Youjin. Characteristics of nitrogen and phosphorus underground loss in karst slope farmlands under simulated rainfall[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(3): 62-70.
- [34] 袁红, 胡宁, 黄运湘, 张扬珠, 何寻阳, 谢红霞. 西南岩溶坡地土壤流失的养分含量响应特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(12): 7313-7314.  
YUAN Hong, HU Ning, HUANG Yunxiang, ZHANG Yangzhu, HE Xunyang, XIE Hongxia. Study on the response of soil nutrient content to soil loss in karst sloping land of Southwest China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(12): 7313-7314.
- [35] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 袁应飞, 赵龙山. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 131-140.



- PENG Xudong, DAI Quanhou, LI Changlan, YUAN Yingfei, ZHAO Longshan. Effect of simulated rainfall intensities and underground pore fissure degrees on soil nutrient loss from slope farmlands in karst region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2): 131-140.
- [36] 李昌兰, 戴全厚, 彭旭东, 袁应飞. 喀斯特裸坡地地下孔(裂)隙流养分流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 19-23.
- LI Changlan, DAI Quanhou, PENG Xudong, YUAN Yingfei. Characteristics of nutrient loss in runoff of underground pore fissure on the karst bare slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 19-23.
- [37] 张信宝. 造林困难地区植被恢复的科学检讨及建议[J]. *人民长江*, 2004, 35(10): 6-7.
- ZHANG Xinbao. Scientific examination and suggestions of vegetation restoration in afforestation-difficult area[J]. *Yangtze River*, 2004, 35(10): 6-7.
- [38] 张信宝, 王世杰, 曹建华. 西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物质平衡与土壤流失[J]. *地球与环境*, 2009, 37(2): 97-102.
- ZHANG Xinbao, WANG Shijie, CAO Jianhua. Mass balance of silicate minerals in soils and soil losses in the karst mountainous regions of Southwest China[J]. *Earth and Environment*, 2009, 37(2): 97-102.
- [39] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究[J]. *水土保持学报*, 1990, 4(3): 7-14.
- XIE Mingshu. A study on the soil mechanical role of tree roots in the stability of slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 4(3): 7-14.
- [40] 石燕金, 周运超. 石漠化喀斯特皆伐迹地的土壤侵蚀特征[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(5): 114-119.
- SHI Yanjin, ZHOU Yunchao. Soil erosion characteristics of clear cutting plots in karst rocky desertification area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(5): 114-119.
- [41] 周梦玲, 郭建斌, 周金星, 王磊, 陈霄, 闫伟鹏. 丹江口库区喀斯特坡地不同植被覆盖类型的产流产沙特征[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(2): 81-87.
- ZHOU Mengling, GUO Jianbin, ZHOU Jinxing, WANG Lei, CHEN Xiao, YAN Weipeng. Characteristics of runoff and sediment yield from different vegetation types in the karst region of Danjiangkou Reservoir area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(2): 81-87.
- [42] 孔洁. 典型表层岩溶泉域水土流失过程与泥沙来源研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- KONG Jie. Leakage water and soil process and sources of sediment from typical epikarst springs[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [43] Gosden Ms. Peat deposits of scar close Ingleborough, Yorkshire[J]. *Journal of Ecology*, 1968, 56(2): 345-353.
- [44] 杨长春. 喀斯特地区土壤侵蚀研究进展[J]. *中国水土保持*, 2012(3): 15-17.
- YANG Changchun. Research progress of soil erosion in karst area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012(3): 15-17.
- [45] 王正雄. 岩溶槽谷区坡地水土流失过程及控制因素分析[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- WANG Zhengxiong. Analysis of soil and water loss process and control factors in slope land of karst trough area[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [46] 周永华. 岩溶洼地水土流失特征及防治技术试验[D]. 南宁: 南宁师范大学, 2019.
- ZHOU Yonghua. Soil and water leaking characteristics in karst depressions and its prevention and control technology test[D]. Nanning: Nanning Normal University, 2019.
- [47] 胡奕, 戴全厚, 王佩将. 喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 46-51.
- HU Yi, DAI Quanhou, WANG Peijiang. Runoff features and the influencing factors on karst sloping farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 46-51.
- [48] 杨智, 戴全厚, 黄启鸿, 吴学强. 典型喀斯特坡面产流过程试验研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 78-81.
- YANG Zhi, DAI Quanhou, HUANG Qihong, WU Xueqiang. Experimental study of runoff processes on typical karst slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 78-81.
- [49] 朱晓锋, 陈洪松, 付智勇, 王克林, 张伟, 徐勤学, 方荣杰. 喀斯特灌丛坡地土壤-表层岩溶带产流及氮素流失特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2197-2206.
- ZHU Xiaofeng, CHEN Hongsong, FU Zhiyong, WANG Kelin, ZHANG Wei, XU Qinxue, FANG Rongjie. Runoff and nitrogen loss characteristics in soil-epikarst system on a karst shrub hillslope[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2197-2206.
- [50] 罗为群, 蒋忠诚, 韩清延, 曹建华, 裴建国. 岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J]. *中国水土保持*, 2008, 2(12): 46-49.
- LUO Weiqun, JIANG Zhongcheng, HAN Qingyan, CAO Jianhua, PEI Jianguo. Soil distribution and erosion characteristics in different landforms of karst peak cluster depression[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008, 2(12): 46-49.
- [51] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 29-32.
- SU Weici. Controlling model for rocky desertification of karst mountainous region and its preventing strategy in Southwest, China[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2002, 16(2): 29-32.
- [52] 魏兴萍, 袁道先, 谢世友. 运用<sup>137</sup>Cs与土壤营养元素探讨重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失和漏失[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 16-19.
- WEI Xingping, YUAN Daoxian, XIE Shiyu. Study on soil erosion and loss on slope in karst mountain valley area of Chongqing valley with <sup>137</sup>Cs and soil nutrient elements[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 16-19.
- [53] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 878-888.
- XIONG Kangning, LI Jin, LONG Mingzhong. Features of soil

- and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 878-888.
- [54] 彭旭东, 戴全厚, 杨智, 赵龙山. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1237-1248.  
PENG Xudong, DAI Quanhou, YANG Zhi, ZHAO Longshan. Sediment yield of surface and underground erosion in the process of rocky desertification of karst area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1237-1248.
- [55] 李阳兵. 中国西南岩溶山地石漠化转型演变解析[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 698-706.  
LI Yangbing. Analysis on transformation and evolution of rocky desertification in karst mountainous areas of Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 698-706.
- [56] 吴清林, 梁虹, 熊康宁, 李瑞. 喀斯特地区水土流失监测方法评述[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(3): 30-38.  
WU Qinglin, LIANG Hong, XIONG Kangning, LI Rui. Reviews of soil leakage loss monitoring in karst areas[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2020, 38(3): 30-38.
- [57] 李晋, 熊康宁, 王仙攀. 喀斯特地区小流域地下水流失观测研究[J]. *中国水土保持*, 2012, 5(6): 38-40.  
LI Jin, XIONG Kangning, WANG Xianpan. Observation of subterranean soil and water loss of karst area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012, 5(6): 38-40.
- [58] 赵恬茵, 王志兵, 吴媛媛, 傅良同, 高礼安. 基于指纹识别技术的小流域泥沙来源研究进展[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 377-382.  
ZHAO Tianyin, WANG Zhibing, WU Yuanyuan, FU Liangtong, GAO Lian. A Review of studies on sediment sources of small catchments using composite fingerprinting[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2): 377-382.
- [59] 杨明义, 田均良, 刘普灵. 应用<sup>137</sup>Cs研究小流域泥沙来源[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(3): 49-53.  
YANG Mingyi, TIAN Junliang, LIU Puling. Studying sediment sources in small watershed using <sup>137</sup>Cs tracing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 5(3): 49-53.
- [60] 杨明义, 徐龙江. 黄土高原小流域泥沙来源的复合指纹识别法分析[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 30-34.  
YANG Mingyi, XU Longjiang. Fingerprinting suspended sediment sources in a small catchment on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 30-34.
- [61] 赵恬茵, 王志兵, 吴媛媛, 傅良同, 高礼安. 淤地坝沉积泥沙解译小流域土壤侵蚀信息研究进展[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 400-404.  
ZHAO Tianyin, WANG Zhibing, WU Yuanyuan, FU Liangtong, GAO Lian. Review of studies on using sediment in check dam to interpret soil erosion information of small catchment[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4): 400-404.
- [62] 赵恬茵. 复合指纹识别法研究黄土高原小流域泥沙来源[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.  
ZHAO Tianyin. Study on sediment sources in catchments on the Loess Plateau using composite fingerprinting[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2017.

## Review of the quantitative study on soil leakage in karst area

ZHAO Tianyin<sup>1</sup>, WU Yuanyuan<sup>3</sup>, SUN Lianqun<sup>1</sup>, GAO Changchun<sup>1</sup>,  
PAN Wangsheng<sup>1</sup>, XU Yufeng<sup>1</sup>, CHENG Fudong<sup>2</sup>

( 1. Qiannan Normal University for Nationalities. Duyun, Guizhou 558000, China; 2. Qiannan Soil and Water Conservation Station, Duyun, Guizhou 558000, China; 3. Xi'an Piesat Information Technology Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710000, China )

**Abstract** Soil loss in karst area is divided into surface soil loss and soil leakage. The binary and three-dimensional hydrogeologic structure in karst area provides space condition for its soil leakage. Different from surface soil loss, soil leakage is the transport and deposition of soil from the surface to the underground space. The strong karstification provides multifarious paths for soil leakage. Due to the complexity and variability of loss paths, the diversity and interactivity of influencing factors and the multi-interface nature of subsurface hydrological processes, a quantitative analysis of soil leakage in karst area is always one of the important issues in soil erosion research and one of the difficult questions in soil erosion forecasting and monitoring. Focused on influencing factors of soil leakage, this study is aimed at analyzing the effects of environmental factors such as soil properties, vegetation, rainfall characteristics, terrain feature and human activities on soil leakage. For quantitative tracing of sediment source in such levels as runoff plots, cave catchment area and watershed in spatial scale, four main quantitative methods about evaluating soil leakage in karst area, such as simulated runoff plot method, cave drip tracer method, traditional model method and composite fingerprinting, have been analyzed and compared. These four quantitative research methods have their own advantages

( 下转第 108 页 )

trade-off relationship with water yield and food supply, and a synergic relationship with soil retention. Water yield shows a trade-off relationship with soil retention, and a synergic relationship with food supply. Soil retention and food supply are in a trade-off relationship. Finally, compared with the situation in 2018, the degree of trade-off in the moderate ecological governance scenario is acceptable, implying that it will be a reasonable ecological governance.

Therefore, we should pay close attention to the control of rocky desertification in the areas with the slope  $> 20^\circ$  in the future. We believe the conclusions of this study can provide a clear direction for the control of rocky desertification. However, there still exist limitations. For example, the accuracy of basic data should be continuously improved, and more factors affecting the ecosystem services should also be taken into account in future studies.

**Key words** rocky desertification, ecosystem, CLUE-S model, trade-off and synergy, karst graben basin

(编辑 黄晨晖)

(上接第 70 页)

and limitations. The simulated runoff plot method can quickly and intuitively monitor the soil leakage at a small spatial and temporal scale. However, its result is highly sensitive to external environmental factors such as rainfall and physical and chemical properties of soil. The cave drip method can only trace the soil loss that occurs by cave dropping water, which is quite different from the actual loss in the cave catchment. However, as a new leakage research method, it provides a new idea for leakage monitoring. The determination of soil leakage at watershed scale mainly includes model method and fingerprinting identification method. The traditional model method can directly monitor the leakage at the watershed scale, but there are some limitations in practice. First of all, the traditional method requires clear underground runoff outlet in the basin and no exchange and superposition between underground runoff and surface runoff. Secondly, it is requested that the surface and underground sediment production and drainage only occur in the basin without the disturbance by other basins. Thirdly, for the traditional model method, the underground or surface runoff sediment discharge should be monitored at fixed points, and the accuracy of sediment amount is greatly affected by the location of monitoring point and monitoring time. To some extent, fingerprinting identification method can be used to solve some problems of traditional model method, but it also has some limitations such as the selection of sediment sources, the screening of fingerprinting factors and the correction of retention of them. In this paper, the future study focuses on soil leakage in karst area are also pointed out by analyzing the problems of research on soil leakage. The collation of quantitative research on soil leakage in karst area provides a reference for exploring the driving mechanism of soil leakage and for further studying the coupling relation between soil leakage and environmental factors.

**Key words** karst area, soil leakage, quantitative study, influencing factor

(编辑 张玲 杨杨)