

喀斯特岩溶裂隙对地下径流和氮素垂直渗漏的影响

吴丽萍^{1,2,3}, 陈洪松^{1,2}, 付智勇^{1,2}, 王克林^{1,2}, 张伟^{1,2}, 王升^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了探究水土流失过程对岩溶裂隙发育形态的响应, 采用野外模拟降雨试验, 研究了裂隙出露型岩土(XL)、裂隙埋藏型岩土(XM)两种结构形态岩溶裂隙对地下径流及氮素垂直渗漏的影响, 并以全土微区(QT)为对照。结果表明: 裂隙出露型岩土(XL)、裂隙埋藏型岩土(XM)和全土(QT)3个处理中地下径流对降雨的响应时间表现为 $XL < XM < QT$, 其初始地下径流产流时间分别是 29, 77, 139 min, XL 和 XM 初始地下径流产流时间分别比 QT 减少了 79.14%, 44.60%; 降雨产流阈值分别为 20.64, 55.06, 94.90 mm, 以 QT 的降雨产流阈值为基准, XL 和 XM 的降雨产流阈值分别减少了 78.25%, 41.98%; 地下径流达到稳定的时间分别为 59, 107, 169 min, 稳定径流速率分别为 42.09, 42.36, 38.24 mm/h。不同结构形态岩溶裂隙下 XL 全氮、硝态氮渗漏浓度最高, 浓度均值分别为 11.64, 10.45 mg/L, 除 XM 外, XL、QT 在降雨结束前地下径流中的全氮、硝态氮浓度基本达到稳定; 不同结构形态岩溶裂隙下全氮渗漏量表现为 $XL > XM > QT$, 硝态氮渗漏量表现为 $XM > XL > QT$, 地下径流中氮素输出的主要形式为硝态氮, 其比例约占全氮渗漏量的 82.32%~90.12%, 而铵态氮渗漏量占全氮渗漏量的比例不足 2%。裂隙的存在, 尤其是出露地表裂隙的存在, 增加了微区底部单位面积土壤地下径流速率, 同时还增加了微区底部单位面积土壤氮素渗漏量, 喀斯特地区普遍存在的裂隙结构促进了水分入渗, 加剧了地下径流中氮素的渗漏。本研究相关结果可为喀斯特地区水土流失机制的探索以及物质迁移模型的构建提供科学依据。

关键词: 喀斯特地区; 模拟降雨; 裂隙; 地下径流; 氮素渗漏

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0064-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.011

Effects of Karst Fissures on Subsurface Runoff and Nitrogen Vertical Leaching

WU Liping^{1,2,3}, CHEN Hongsong^{1,2}, FU Zhiyong^{1,2},

WANG Kelin^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, WANG Sheng^{1,2}

(1. Key laboratory of Agra-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture,

Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems,

Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: To explore the responses of soil and water loss to the development of karst fissures, the effects of two different karst fissures structures: fissures exposed rock-soil (XL) and fissures buried rock-soil (XM) on subsurface runoff and nitrogen leaching were studied through rainfall simulation experiments, in which soil experimental micro-plots (QT) were selected as control. The results showed that the responses time of subsurface runoff under different karst fissures structures listed in the order of $XL < XM < QT$, the responses time of subsurface runoff to the rainfall were 29, 77, and 139 min, respectively, and responses time of subsurface runoff of XL and XM reduced by 79.14% and 44.60% compared to QT, respectively. The rainfall thresholds were 20.64, 55.06, and 94.90 mm, respectively, and rainfall threshold of XL and XM reduced by 78.25% and 41.98% compared to QT, respectively. The times of the stability of subsurface runoff rate were 59, 107, and 169 min, and the stability of subsurface runoff rates were 42.09, 42.36, and 38.24 mm/h, respectively. The nitrate nitrogen and nitrogen concentration were the highest in XL, which could reach 11.64, 10.45 mg/L, respectively. The nutrient concentration in subsurface runoff reached a stable value in

收稿日期: 2017-03-21

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452703); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502403); 国家自然科学基金项目(41671287)

第一作者: 吴丽萍(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事喀斯特土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wuliping15@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 付智勇(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事坡面水文与土壤侵蚀研究。E-mail: zyfu@isa.ac.cn

XL and QT prior to runoff stopped. The total nitrogen amount under different karst fissures structures followed the order of $XL > XM > QT$, nitrate nitrogen leaching listed in the order of $XM > XL > QT$. Under different karst fissures structures, nitrate nitrogen was the main component of nitrogen leaching, which accounted for 82.32%~90.12% in total nitrogen leaching amount, however, the proportion of ammonia nitrogen was less than 2%. The existence of the fissures, especially the existence of the XL, could enhance both the subsurface runoff rate and the leaching of nitrogen for per unit area soil, the soil which at the bottom of the experimental micro-plot. Because of the widely developed fissures in karst region, the infiltration of water was promoted, moreover, the leaching of nitrogen was intensified too. The relevant results can provide scientific basis for explore the mechanisms of soil and water loss as well as construction material migration model in karst region.

Keywords: karst region; simulated rainfall; fissures; subsurface runoff; nitrogen leaching

氮在农业生产中发挥着重要的作用,也是造成农业非点源污染的主要原因^[1]。近年来,土地利用方式的急剧变化以及不合理的农业管理措施导致了大量氮素流失^[2]。其中,土壤中硝态氮的淋溶流失不仅是氮素损失的重要途径之一^[3],也是导致地下水资源氮素污染的重要原因^[1]。影响氮素流失的因素包括气候、土壤、种植、施肥等多种因素,但概括而言,总是与水分下渗同步^[4]。Ceccon等^[5]研究发现意大利东北部地区的浅层砾质土壤氮素的渗漏是该地区土壤中氮素损失的主要途径之一,渗漏量可达5%~41.9%;Libutti等^[6]研究发现意大利南部地区农田氮素渗漏总量平均每年可达156 kg/hm²;李宗新等^[7]在山东半湿润暖温带气候条件下研究表明,在夏玉米生长期硝态氮累计淋溶量可占氮肥施入总量的3.49%~11.35%。喀斯特地区岩溶裂隙和岩溶管道普遍存在,水文条件复杂、岩溶及其发育而形成特殊的地表地下二元结构,在降雨条件下或含水量较高时填充在地下孔隙中的土壤往往呈可塑、软塑甚至流塑状态进入地下岩溶管道,形成喀斯特地区特有的“地下漏失”^[8]。

喀斯特地区基岩裸露,土被不连续,土壤发育空间差异较大,有的位置无土壤覆盖,而最深的土层厚度可深达4 m以上^[9]。根据学者调查研究^[10-11],喀斯特地区上覆土壤厚度大多在0—60 cm,其地下则在碳酸盐岩溶蚀作用下多发育岩溶裂隙、管道等。张志才等^[12]通过野外调查发现表层岩溶带平均裂隙率为5.3%,裂隙发育随深度增加而减弱,并通过野外注水试验发现表层岩溶带中垂向裂隙对表层岩溶带水分入渗补给起着重要作用,是连接地表与地下水的重要通道;雷俐等^[13]通过调查广东粤北连南两个典型岩溶山地剖面,发现裂隙土占整个断面面积的5.3%~8.9%。由于喀斯特地区地下环境的复杂性、隐蔽性等原因,虽然喀斯特地区特殊的地下流失方式被广泛关注^[14-16],但这些研究主要集中在地下水流失现状、机理及概念模型上,尚缺乏从地表、地下三维视角对水土流失和养分迁移进行耦合研究。虽然相

关学者^[17-18]通过调节变坡钢槽底部上下两个底板间孔洞的重合面积进行模拟地下孔(裂)隙度进而研究喀斯特地区产流产沙、养分流失等特征,然而采用钢槽底板圆孔来模拟喀斯特坡面地下裂隙与野外实际裂隙发育情况还存在较大差异。因此,本文针对喀斯特地区普遍存在的地下裂隙、管道结构,利用自行设计的微区,将切割好的固定规格的岩块按比例放入设计好的微区中,堆砌成不同裂隙度的岩体,用以模拟复杂多变的喀斯特岩—土裂隙环境,探讨模拟降雨条件下,不同结构形态岩溶裂隙对地下径流和土壤氮素垂直渗漏的影响,为了进一步阐明裂隙、裂隙之间单位面积土壤大小对地下径流和氮素垂直渗漏的影响,对比分析了微区底部单位面积土壤地下径流及氮素渗漏的变化规律,以期对喀斯特地区水土和养分流失阻控技术的提出提供理论和方法指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

降雨试验在广西壮族自治区环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站野外溶质运移模拟装置微区进行,模拟降雨系统采用付智勇等^[19]发明的“适宜高异质性喀斯特坡地的可升降便携式模拟降雨器”,该降雨器采用组合式喷嘴,高度可调,方便携带,制作简单。雨滴下降高度8 m,雨滴终点速度满足天然降雨特性,降雨均匀度大于80%,雨强连续变化范围为30~120 mm/h,有效控制面积为18.62~21.18 m²。试验微区采用张伟等^[20]设计的适用于喀斯特地区的土壤侵蚀与养分迁移模拟装置。该微区装置(图1)为钢筋混凝土结构,上端为长宽高分别为200 cm×200 cm×120 cm的收纳池,用于装填不同裂隙度的预制石灰岩岩块和土壤,通过控制岩石性状和体积,设置不同裂隙度和裂隙产状。收纳池底端为现浇钢筋水泥板,现浇板上带有30个直径为10 cm的带网筛的排水孔,排水孔底端与排水采集器基座相连。模拟装置微区的基座包括两个部分,一部

分为钢筋混凝土构架的承重基槽;另一部分是插入基槽中的可抽拉的集水槽,用于收集上部收纳池中渗下的水和土壤颗粒。微区中的土壤采自广西壮族自治区中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站发育于白云岩的棕色石灰土 0—100 cm 洼地,其全氮含量为 3.97 g/kg,全磷含量为 0.40 g/kg,速效磷含量为 34.10 mg/kg,速效钾含量为 67.50 mg/kg,土壤 pH 8.39,砂粒、粉粒和黏粒分别为 48.71%,25.31%,25.98%。供试土壤不过筛,只对大的土壤团块进行分散处理,风干、均匀混合待试验所用。

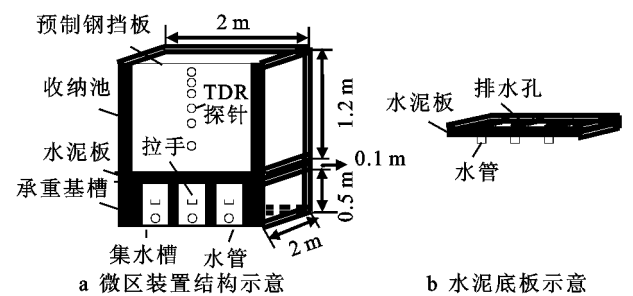


图 1 微区设计示意

1.3 样品分析

水样中的全氮、硝态氮和铵态氮的质量浓度均采用 AA3 流动分析仪进行分析测试。

水样中氮素渗漏量的计算公式^[21]为:

$$m(t)=C(t)\times R(t)$$

式中: $m(t)$ 为水样中的氮素渗漏量(mg); $C(t)$ 为水样中氮素质量浓度(mg/L); $R(t)$ 为单位时间地下径流量(L)。

2 结果与分析

2.1 不同结构形态岩溶裂隙微区地下径流特征

2.1.1 微区地下径流速率以及微区底部单位面积土壤地下径流速率 不同结构形态岩溶裂隙地下径流速率见图 2。在模拟降雨条件下,XL、XM 和 QT 地下径流对降雨的响应时间表现为 XL>XM>QT,其初始地下径流产流时间分别是 29,77,139 min,,XL 和 XM 初始地下径流产流时间分别比 QT 减少了 79.14%,44.60%。随着降雨的持续,地下径流速率逐渐增加,XL、XM 和 QT 分别在 59,107,169 min 左右达到稳定状态,稳定地下径流速率分别为 42.09,42.36,38.24 mm/h。其中 XL 地下径流过程波动较大,而 XM 和 QT 的地下径流过程则波动不明显,究

1.2 试验设计

根据喀斯特地区典型岩土结构类型,本研究按照裂隙率 10%,以裂隙出露型岩土微区(XL)和裂隙埋藏型岩土微区(XM)为研究对象,并与全土微区(QT)为对照,每个处理 2 个重复,处理试验结果为重复均值。这里的裂隙率指的是石灰岩岩块之间的裂隙填充物(土壤)的体积与石灰岩岩块及岩块之间的土壤的总体积之比,其中 XL 由高 110 cm 的石灰岩岩块及岩块与岩块之间的土壤组成;XM 由高 50 cm 石灰岩岩块及土壤组成,二者在垂直空间上构成“上覆土壤、下伏岩石,岩石之间有 10%裂隙填充物”的岩土二元介质;QT 内部填充土壤,无石灰岩岩块(表 1)。

野外模拟降雨试验于 2015 年 7—8 月中旬进行,根据当地多年降水特征,试验雨强设计为 35 mm/h,地下径流产流后每隔 5 min 用 250 mL 塑料瓶采集集水槽水样用以测定氮素渗漏浓度,其余水样用塑料大桶承接并计算其体积,降雨历时视各微区初始地下径流产流时间而定,每个微区底端出流 85 min 后结束降雨。

表 1 试验设计及微区特征

微区 编号	微区 名称	实际雨强/ (mm·h ⁻¹)	降雨 历时/min	前期土壤 含水量/%	岩石 体积/m ³	微区底部 总面积/m ²	微区底部 土壤面积/m ²	裂隙率/ %
XL	裂隙出露型	42.7	109	18.28	1.80	4	0.4	10
XM	裂隙埋藏型	42.9	157	22.27	3.96	4	0.4	10
QT	全土	41.0	219	20.84	0	4	4.0	0

其原因,可能是 XL 土壤体积较小、裂隙发育程度高导致 XL 地下径流过程不稳定。由于各微区对降雨响应时间的差异,导致不同结构形态岩溶裂隙微区的地下径流速率在相同的时间内差异很大,在降雨时间为 90 min 时,XL 地下径流速率已达到 42.70 mm/h,而 XM 才刚开始,QT 此时还未响应。

由图 2 可以看出,不同结构形态岩溶裂隙微区底部单位面积土壤地下径流速率表现为 XL>XM>QT、XL 和 XM 底部单位面积土壤平均地下径流速率分别为 94.76,84.57 mm/h,分别是 QT 的 11.03,9.84 倍。通过对比各微区地下径流速率与各微区底部单位面积土壤地下径流速率可知,各微区底部单位面积土壤地下径流速率与整个微区的变化趋势一致,但由于裂隙发育,土壤横切面积较小,导致 XL 和 XM 底部单位面积土壤地下径流速率要远远大于整个微区的地下径流速率;而 QT 底部土壤面积大,微区底部单位面积土壤地下径流速率要小于微区地下径流速率。

2.1.2 不同结构形态岩溶裂隙微区累积地下径流量与累积降雨量的关系 由图 3 可以看出,累积地下径流量与累积降雨时间呈极显著线性相关,不同结构形态岩溶裂隙微区累积地下径流量递增斜率大小表现为 XL

(0.935)>QT(0.880)>XM(0.872),截距大小表现为XL(-22.404)>XM(-54.285)>QT(-86.344),不同结构形态岩溶裂隙微区主要通过影响初始地下径流产流时间进而影响单位时间上的累积地下径流量(表2)。不同结构形态岩溶裂隙微区降雨产流阈值差别较大,XL、XM和QT的降雨产流阈值分别为20.64,55.06,94.90 mm,XL和XM的降雨产流阈值分别比QT减少了78.25%,41.98%。同时,不同结构形态岩溶裂隙微区累积地下径流量相差也较大,XL在累积降雨量为77.57 mm时,累积地下径流量达到了51.06 mm,而在累积降雨量为77.57 mm时,XM累

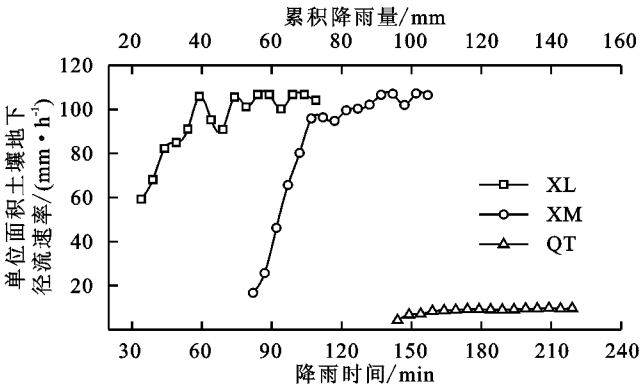
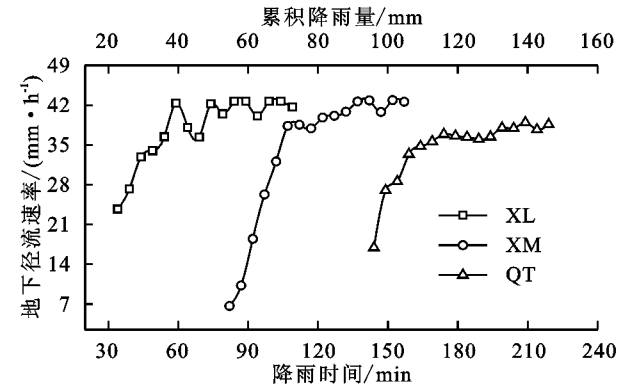


图2 不同结构形态岩溶裂隙微区地下径流速率动态过程

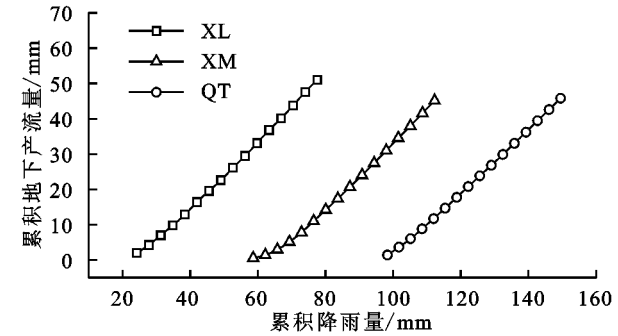


图3 不同结构形态岩溶裂隙微区累积地下径流变化过程

表2 不同结构形态岩溶裂隙微区累积地下径流量(y)与累积降雨量(x)拟合方程

微区类型	拟合方程	R ²
XL	$y = -22.404 + 0.935x$	0.998
XM	$y = -54.285 + 0.872x$	0.991
QT	$y = -86.344 + 0.880x$	0.999

2.2 不同结构形态岩溶裂隙微区氮素渗漏特征

土壤氮素在侵蚀条件下随径流迁移表现为3种方式:(1)土壤液相中的可溶性氮素在径流中的溶解;(2)土壤颗粒吸附的矿质氮在径流中的解吸;(3)土壤颗粒中的氮素随产流在坡面中传递和水体携带^[22]。在本次试验中,泥查漏失总量不足20 g,与地下径流量相比可以忽略不计,养分主要是随水分垂直渗漏。

2.2.1 不同结构形态岩溶裂隙微区氮素浓度变化过程 由图4可以看出,地下径流过程中,XL全氮、硝

积地下径流量为11.01 mm,QT此时还未产生地下径流,在累积降雨量为149.51 mm时,QT累积地下径流量才为45.82 mm;XL的降雨阈值要比其他两个微区的降雨阈值小得多,但XL累积地下径流量要比其他两个微区大。根据降雨等级划分标准,20.64 mm(24 h)属于中雨,55.06,94.90 mm(24 h)属于暴雨,在亚热带季风气候的西南喀斯特地区,中雨较为常见,暴雨偶尔发生,充沛的降雨量加速了岩石裸露、裂隙管道高度发育的喀斯特地区地下径流的流失,这也是导致喀斯特地区水土流失隐蔽性和保水能力差的主要原因。

态氮浓度最高,浓度均值分别达11.64,10.45 mg/L,全氮、硝态氮浓度整体呈下降趋势,且在降雨初期下降较快,在后期下降趋势相对平缓。这主要是因为XL裂隙发育、土壤体积含量相对较少从而入渗的降雨能够与土壤快速的进行充分相互作用,使得在地下径流初期全氮、硝态氮浓度较大,由于土壤体积有限,随着降雨的进行,土壤中全氮、硝态氮渗漏殆尽,其浓度逐渐下降。XM全氮、硝态氮浓度在降雨历时110 min之前,渗漏浓度较低,而后浓度呈上升趋势,其全氮、硝态氮浓度由地下径流初期的4.07,3.73 mg/L增加至降雨结束前的12.22,10.29 mg/L。这主要是因为该微区前期地下径流速率较小,不能与土壤中的养分发生充分的作用,溶出的全氮、硝态氮有限,在后期,随着地下径流速率增大,土壤中的全氮、硝态氮被逐渐淋溶出来,导致全氮、硝态氮浓度逐渐增大。QT全氮、硝态氮浓度在整个降雨过程中一直较稳定,这主要是因为QT土壤体积大,降雨历时久,在初始地下径流产流之前,土壤与雨水已发生了充分的淋溶作用,而又由于土壤体积相对较大,能够为氮素渗漏提供更多的氮源,故全氮、硝态氮保持比较平稳的渗漏浓度。

各微区铵态氮渗漏浓度表现出相似的特征,其铵态氮渗漏浓度都很低,围绕0.1 mg/L上下波动,这主要因为铵态氮带正电荷易被带负电荷的土壤颗粒吸附,几乎不发生淋溶损失^[23]。

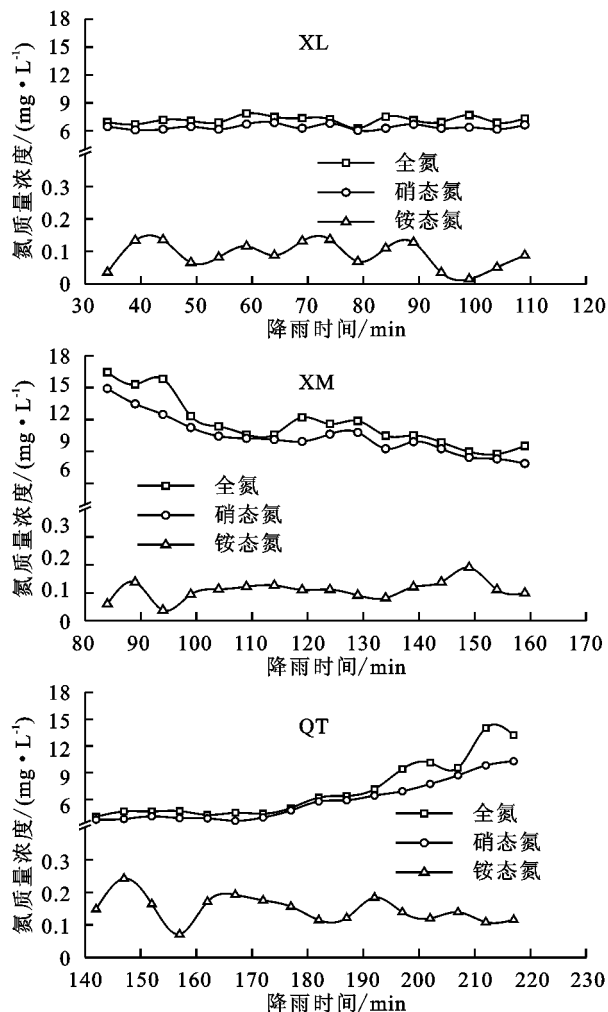


图 4 不同结构形态岩溶裂隙微区氮素浓度变化特征

2.2.2 微区氮素渗漏以及微区底部单位面积土壤氮素渗漏过程 不同结构形态岩溶裂隙微区氮素渗漏量变化过程见图 5。不同结构形态岩溶裂隙微区全氮、硝态氮渗漏量的变化趋势不一样。XL 全氮、硝态氮渗漏量无明显的变化趋势,这主要与裂隙出露型岩土微区的地下径流速率及全氮、硝态氮的浓度变化趋势有关,随着降雨的持续,XL 的地下径流速率逐渐增加,而全氮、硝态氮的浓度逐渐下降,这使得在整个降雨的过程中 XL 的全氮、硝态氮渗漏量的变化趋势不明显。XM 全氮、硝态氮渗漏量呈较快的上升趋势,这是因为 XM 的地下径流速率及全氮、硝态氮的浓度都呈上升趋势。QT 全氮、硝态氮先呈缓慢的上升趋势而后维持平缓的波动趋势,这主要是因为 QT 地下径流在渗漏后快速的维持了稳定以及全氮、硝态氮浓度在整个降雨过程中都保持比较稳定的值,从而使得全土微区的全氮、硝态氮渗漏量也比较平稳。从 3 个处理全氮、硝态氮渗漏的量来看,全氮平均渗漏量表现为 $XL > XM > QT$,硝态氮平均渗漏量表现为 $XL > QT > XM$ 。XL 全氮、硝态氮渗漏量在整个降雨过程中一直保持着较高的量,其渗

漏量总体为 21~35 mg, XM 全氮、硝态氮渗漏量变化幅度较大,渗漏量为 6~42 mg, QT 全氮、硝态氮渗漏量是 3 个处理中最小,渗漏量总体为 7~21 mg。不同结构形态岩溶裂隙微区铵态氮渗漏量均较小,其值为 0~0.5 mg。

各微区底部单位面积土壤氮素渗漏量与整个微区的氮素渗漏量的变化趋势一致(图 5),但 XL 和 XM 底部单位面积土壤全氮、硝态氮渗漏量是整个微区全氮、硝态氮渗漏量的 4 倍,而 QT 底部单位面积土壤全氮、硝态氮渗漏量要比整个微区全氮、硝态氮渗漏量小。通过比较不同结构形态岩溶裂隙微区底部单位面积土壤全氮、硝态氮渗漏量可知,裂隙发育的微区要比 QT 微区底部单位面积土壤氮素渗漏量大很多, XL 底部单位面积土壤全氮、硝态氮渗漏量是 QT 的 17.59, 17.74 倍, XM 底部单位面积土壤全氮、硝态氮渗漏量是 QT 的 10.52, 9.71 倍。由此可见,裂隙的存在,增加了单位面积土壤氮素垂直渗漏量,促进了喀斯特地区土壤氮素渗漏。

在氮素渗漏形态方面,不同结构形态岩溶裂隙微区全氮、硝态氮渗漏量均较高,且同一个微区的全氮、硝态氮相关性很高,具有相同的渗漏趋势,而铵态氮渗漏量很低。通过地下径流中硝态氮和铵态氮渗漏量可知, XL、XM 和 QT 3 个处理的全氮、硝态氮渗漏量分别是铵态氮渗漏量的 101.74, 53.70, 80.47 倍;硝态氮渗漏量占全氮渗漏量的比例可达 82.32%~90.12%(表 3),而铵态氮渗漏量占全氮渗漏量的比例不足 2%,且 3 个处理硝态氮渗漏量均与全氮渗漏量呈极显著相关性,而铵态氮渗漏量与全氮渗漏量相关性不显著。这说明氮素渗漏过程中硝态氮为氮素渗漏的主要形态,而以铵态氮形式渗漏的氮素量占全氮的比例极小,几乎可以忽略不计。

2.2.3 累积氮素渗漏量与累积地下径流量的关系分析 由表 4 可知,不同结构形态岩溶裂隙微区累积氮素渗漏量和累积地下径流量之间存在显著的线性关系,这与任秀文等^[24]的研究结果一致。从斜率来看,不同结构形态岩溶裂隙微区累积氮素渗漏量斜率不一样, XL 累积全氮、硝态氮渗漏量的斜率几乎是 XM 和 QT 渗漏量斜率的 2 倍;同一个微区累积硝态氮渗漏量斜率与累积全氮渗漏量斜率相差不大,但累积硝态氮渗漏量的斜率要远远大于累积铵态氮渗漏量的斜率,这说明累积硝态氮渗漏量是累积全氮渗漏量的主要组成部分。由此可以看出,土壤中各种形态氮素的渗漏量不仅受岩溶裂隙的影响,不同结构形态岩溶裂隙下累积地下径流量的变化也是导致地下径流中氮素渗漏量差异性极显著的主导因子。

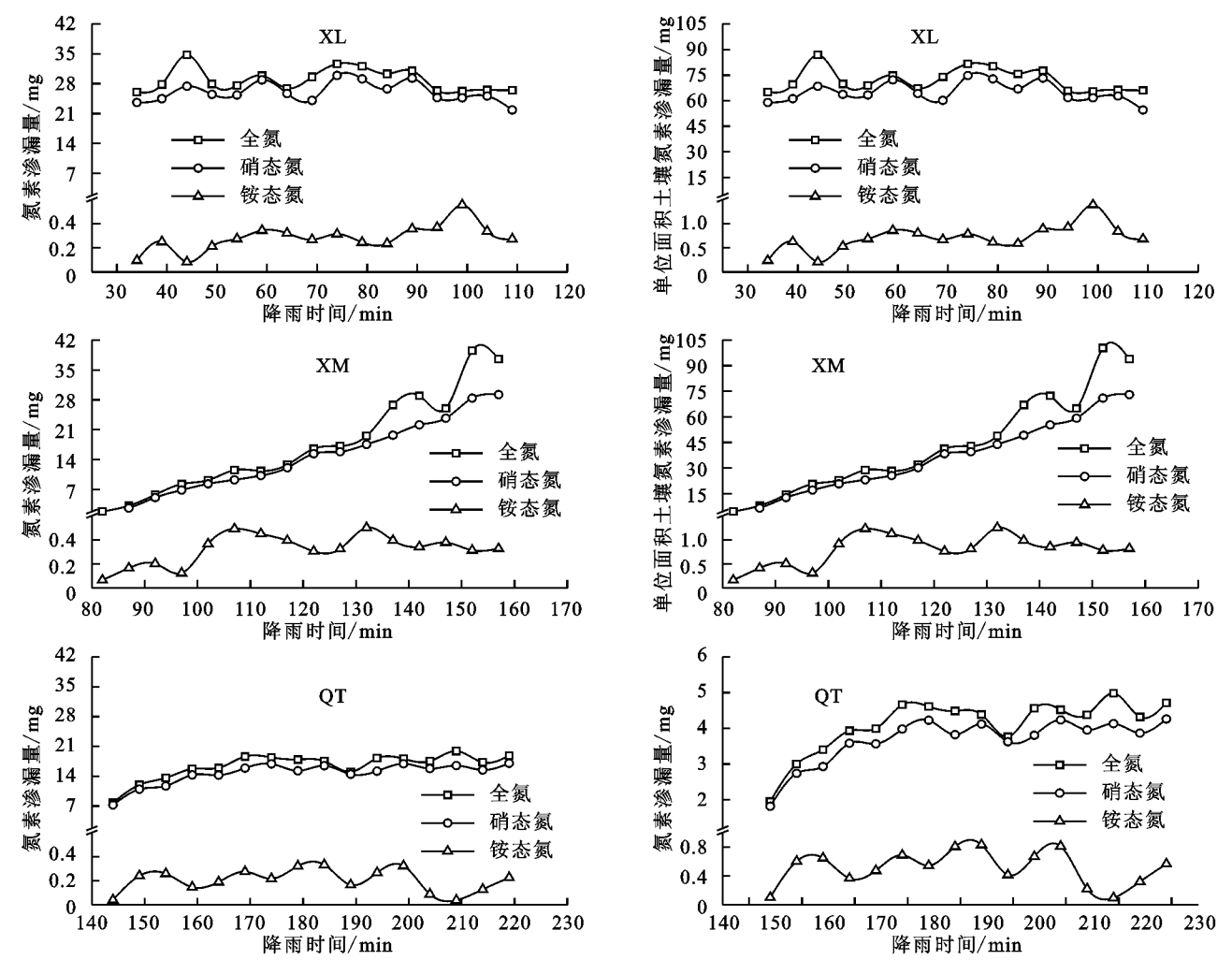


图 5 不同结构形态岩溶裂隙微区氮素渗漏量变化特征

表 3 不同结构形态岩溶裂隙氮素渗漏特征

微区类型	全氮 渗漏量/mg	硝态氮			铵态氮		
		渗漏量/ mg	占全氮 比例/%	与全氮的 相关系数	渗漏量/ mg	占全氮 比例/%	与全氮的 相关系数
XL	2310.42	2082.06	90.12	0.773**	22.71	0.98	-0.341
XM	1383.84	1139.23	82.32	0.984**	25.77	1.86	0.391
QT	1313.30	1173.25	89.34	0.969**	16.32	1.39	0.293

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

表 4 不同结构形态岩溶裂隙微区累积氮素渗漏量(y)与累积地下径流量(x)拟合方程

氮素	XL		XM		QT	
	拟合方程	R ²	拟合方程	R ²	拟合方程	R ²
全氮	y=130.110+44.071x	0.999	y=-95.122+28.626x	0.999	y=-4.502+28.766x	0.997
硝态氮	y=102.766+40.012x	0.992	y=-72.257+24.021x	0.969	y=-2.917+25.696x	0.992
铵态氮	y=-0.982+0.454x	0.998	y=0.497+0.580x	0.980	y=0.364+0.372x	0.988

3 讨论

3.1 不同结构形态岩溶裂隙微区对地下径流的影响

喀斯特地区特殊的溶蚀作用引起岩石垂直节理和裂隙溶蚀发育并形成地下裂隙、管道、落水洞等,为土壤及径流养分向地下流失提供了运移通道^[25-26]。地下裂隙的存在使得该地区地表径流携带的土壤物质淤积在裂隙中,最终沿地下裂隙发生地下流失^[27]。

研究地下裂隙对喀斯特地区氮素随径流流失的影响,对认识喀斯特地区养分流失和面源污染具有重要意义。在本研究中,不同结构形态岩溶裂隙微区径流流失途径主要是通过地下径流流失,这与陈洪松等^[28]对喀斯特野外坡地研究结果一致,即次降雨地表径流很少而坡面降雨几乎全部入渗。喀斯特坡面地表径流只有在高强度或长历时降雨条件下才可能出现^[29]。同时,本研究中不同裂隙微区初始地下径流

产流时间及地下径流速率变化过程对时间的响应特征表明,3 个处理对降雨的响应在时间上差别很大,裂隙出露型岩土微区地下径流对降雨的响应最快,地下径流速率最大,裂隙埋藏型岩土微区次之,全土微区对降雨的响应最慢,地下径流速率最小,这与张志才等^[12]对喀斯特表层岩溶带的研究结果相似,即喀斯特地区表土层入渗率为 133 mm/d,而裂隙渗透系数高达 8 464 mm/d,这主要是因为裂隙出露型岩土微区裂隙发育程度高,岩石体积大、土石比例小,土壤水分在流经该微区时,能够借助其中的裂隙快速的迁移,迅速的到达微区的底部,在短时间内产生较大的渗漏量^[30];裂隙埋藏型岩土微区“上覆土壤,下伏岩石”,上覆的土壤层相对延缓了水分渗漏速率,导致了裂隙埋藏型岩土微区的地下径流的初始时间较裂隙出露型岩土微区的长,又因裂隙埋藏型岩土微区下部裂隙发育可能存在优先流^[31],故裂隙埋藏型岩土微区在地下径流初期地下径流速率较小,而全土微区因不存在裂隙发育且土壤体积大,微区内部的土壤含水量在全部达到饱和后才开始产流,故地下径流初始时间较晚,地下径流总量要远远小于其他两个微区。结合微区底部单位面积土壤地下径流速率可知,由于裂隙发育,土壤横切面积较小,导致裂隙出露型岩土微区和裂隙埋藏型岩土微区的底部单位面积土壤地下径流速率要远远大于全土微区底部单位面积土壤地下径流速率。由此可见,裂隙发育情况对初始地下径流时间及地下径流速率都有重要的影响,裂隙发育程度高、土石比例减小会大大加速雨水向垂直方向渗漏,增加微区地下径流的输出量,促进喀斯特地区水分的地下流失。

3.2 不同结构形态岩溶裂隙微区对氮素渗漏的影响

降雨和径流是土壤溶质迁移的驱动力,也是养分流失的溶剂和载体,对土壤养分随径流流失有着重要影响^[29],其溶解和携带土壤氮素等养分物质通过地表径流及地下径流流失,其不仅造成土壤肥力下降,还造成喀斯特地下水污染。相关研究表明^[32-33],降雨过程中径流养分浓度呈波动变化,不同雨强下地表径流中养分均存在明显的初期径流冲刷效应。而在本研究中,不同裂隙微区的氮素均存在一定程度的波动趋势,但只有裂隙出露型微区的全氮、硝态氮表现出冲刷效应。通过对比不同结构形态岩溶裂隙微区全氮、硝态氮渗漏浓度变化趋势,可以看出微区初始地下径流产流时间、地下径流速率是导致全氮、硝态氮渗漏趋势及浓度差异的重要原因,而微区岩溶裂隙类型的不同则是导致全氮、硝态氮渗漏趋势及浓度差异

的根本原因。各微区的铵态氮浓度均很低,这与潘忠诚等^[23]的研究结果一致。氮素渗漏过程中以铵态氮形式渗漏的氮素量占全氮的比例极小,几乎可以忽略不计,硝态氮为氮素渗漏的主要形态。这与罗艺等^[34]通过对四川盆地紫色丘陵区不同种植模式下氮素淋失特征的研究,发现 4 种植植模式下氮素通过地表径流和渗透水的渗漏形态均以硝态氮为主的研究结果一致。各微区氮素渗漏量与微区底部单位面积土壤氮素渗漏量的大小表现为裂隙发育的微区底部单位面积土壤氮素渗漏量远远大于微区氮素渗漏量,而全土微区底部单位面积土壤氮素渗漏量小于微区氮素渗漏量,究其原因,主要是因为裂隙的存在,增加了微区底部单位面积土壤氮素垂直渗漏量,促进了喀斯特地区土壤氮素渗漏。

4 结论

(1)XL 地下径流对降雨的响应最快(29 min)、渗漏量最多,XM 次之(77 min),而 QT 最慢(139 min)、渗漏量最少;不同结构形态岩溶裂隙微区降雨产流阈值差别较大,XL 和 XM 以及 QT 分别为 20.64,55.06,94.90 mm。

(2)不同结构形态岩溶裂隙下地下径流中全氮、硝态氮的流失浓度表现为 XL>XM>QT,XL 全氮、硝态氮浓度最高,浓度均值分别达 11.64,10.45 mg/L;地下径流中氮素输出的主要形式为硝态氮,其比例约占全氮渗漏量的 82.32%~90.12%。

(3)各裂隙发育的微区底部单位面积土壤地下径流速率及单位面积土壤氮素渗漏量都要大于整个微区的地下径流速率和氮素渗漏量,且裂隙发育的微区要比 QT 地下径流量和氮素渗漏量大很多,喀斯特地区裂隙的存在促进了水分入渗和土壤氮素漏失。

(4)不同结构形态岩溶裂隙下累积地下径流量与累积氮素渗漏量之间存在显著的线性关系,XL 累积全氮、硝态氮渗漏量的斜率几乎是 XM 和 QT 渗漏量斜率的 2 倍;土壤中各种形态氮素的渗漏量不仅受岩溶裂隙的影响,不同结构形态岩溶裂隙下累积地下径流量的变化也是导致地下径流中氮素渗漏量差异性极显著的主导因子。

参考文献:

- [1] Ibrikci H, Cetin M, Karnez E, et al. Irrigation-induced nitrate losses assessed in a Mediterranean irrigation district[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 148(1): 223-231.
- [2] Cao W, Hong H, Yue S. Modelling agricultural nitrogen contributions to the Jiulong River estuary and coast-

- al water[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2): 111-121.
- [3] 王吉苹, 朱木兰, 李青松. 农田土壤氮素渗漏淋失研究进展[J]. *四川环境*, 2014, 33(6): 118-125.
- [4] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展[J]. *土壤*, 1998(6): 291-297.
- [5] Ceccon P, Costa L D, Vedove G D, et al. Nitrogen in drainage water as influenced by soil depth and nitrogen fertilization: A study in Iysimeters[J]. *European Journal of Agronomy*, 1995, 4(3): 289-298.
- [6] Libutti A, Monteleone M. Soil vs. groundwater: The quality dilemma. Managing nitrogen leaching and salinity control under irrigated agriculture in Mediterranean conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 186(5): 40-50.
- [7] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 65-70.
- [8] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 中国南方碳酸盐岩上覆红土形成机制研究进展[J]. *地球与环境*, 2005, 33(4): 29-36.
- [9] Yang J, Nie Y P, Chen H S, et al. Hydraulic properties of karst fractures filled with soils and regolith materials: Implication for their ecohydrological functions[J]. *Geoderma*, 2016, 276(8): 93-101.
- [10] 王升, 陈洪松, 付智勇, 等. 基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1024-1030.
- [11] 周运超, 王世杰, 卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. *地球与环境*, 2010, 38(1): 1-7.
- [12] 张志才, 陈喜, 程勤波, 等. 喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析: 以陈旗小流域为例[J]. *地球与环境*, 2011, 39(1): 19-25.
- [13] 雷俐, 魏兴琥, 徐喜珍, 等. 粤北岩溶山地土壤垂直渗漏与粒度变化特征[J]. *地理研究*, 2013, 32(12): 2204-2214.
- [14] 冯腾, 陈洪松, 张伟, 等. 桂西北喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs的剖面分布特征及其指示意义[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 593-599.
- [15] 周念清, 李彩霞, 江思珉, 等. 普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 7-11.
- [16] 蒋忠诚, 曹建华, 杨德生, 等. 西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 37-42.
- [17] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 2067-2079.
- [18] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 等. 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.
- [19] 付智勇, 陈洪松, 王克林, 等. 一种适宜高异质性喀斯特坡地的可升降便携式模拟降雨器: 中国, 湖南: CN103691594A[P]. 2014-04-02.
- [20] 张伟, 陈洪松, 苏以荣, 等. 一种适用于喀斯特地区的土壤侵蚀与养分迁移模拟装置: 中国, 湖南: CN103454403A[P]. 2013-12-18.
- [21] 王辉, 王全九, 邵明安. PAM对黄土地水分养分迁移特性影响的室内模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 85-88.
- [22] 辛艳, 王瑄, 邱野, 等. 辽宁省不同耕作方式对坡耕地水土及氮磷养分流失的影响效果[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 27-30.
- [23] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 9-13.
- [24] 任秀文, 李开明, 刘爱萍, 等. 模拟降雨条件下红壤坡面硝态氮流失特征研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(增刊1): 119-124.
- [25] Dai Q, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study[J]. *Solid Earth Discussions*, 2015, 7(2): 1639-1671.
- [26] Zhang X B, Bai X Y, He X B. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest china[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2011, 26(2): 149-153.
- [27] 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.
- [28] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121-126.
- [29] 姜光辉, 吴吉春, 郭芳, 等. 森林覆盖的喀斯特地区表层岩溶带的产流阈值[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 72-77.
- [30] 刘琦, 顾展飞, 卢耀如, 等. 贵州施秉白云岩溶蚀特性及孔隙特征实验研究[J]. *地球学报*, 2015, 36(4): 413-418.
- [31] 方胜, 彭韬, 王世杰, 等. 喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究[J]. *地球与环境*, 2014, 42(1): 1-10.
- [32] Ramos M C, Martinezcasasnovas J A. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedes region (NE Spain) [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 113(1): 356-363.
- [33] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(6): 2151-2158.
- [34] 罗艺, 吴福忠, 杨万勤, 等. 四川盆地紫色丘陵区不同种植模式下氮流失特征[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2221-2228.