

南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制

欧阳帅^{1,2}, 项文化^{1,2}, 陈亮^{1,2}, 曾叶霖^{1,2},
胡彦婷^{1,2}, 雷丕锋^{1,2}, 方晰^{1,2}, 邓湘雯^{1,2}

(1.中南林业科技大学生命科学与技术学院,长沙 410004;
2.湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站,湖南 会同 438107)

摘要:我国南方山地丘陵区由于人类活动对森林植被的破坏和暴雨频繁导致的水土流失已引起广泛关注。森林植被恢复改变冠层结构、地表覆盖物和土壤性质等作用界面,从而影响降雨侵蚀过程,是调控水土流失的有效措施。因此,对国内外的相关研究成果进行较为系统的回顾,从植被冠层(林冠和林下植被)、地表覆盖物(凋落物和生物结皮)和土壤(根系、微生物和团聚体)作用界面消减降雨侵蚀力和增强土壤抗侵蚀性等研究视角,分析南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制,提出了现有研究中存在的问题及研究趋势,对深入认识森林植被对水土流失的调控机制,提高南方山地丘陵区森林植被的水土保持效益具有重要的实际意义。

关键词:植被恢复;地表径流;土壤侵蚀;微生物;调控机制;山地丘陵区

中图分类号:S157.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2021)05-0001-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.001

Regulation Mechanisms of Forest Vegetation Restoration on Water and Soil
Erosion in Mountainous and Hilly Area of Southern China

OUYANG Shuai^{1,2}, XIANG Wenhua^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, ZENG Yelin^{1,2},
HU Yanting^{1,2}, LEI Pifeng^{1,2}, FANG Xi^{1,2}, DENG Xiangwen^{1,2}

(1.School of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and
Technology, Changsha 410004; 2.Huitong National Field Station for Scientific Observation and
Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong, Hunan 438107)

Abstract: Water and soil erosion due to destruction of forest vegetation by the intense human activities and frequent rainstorm in mountainous and hilly area of southern China has attracted extensive attention. Forest vegetation restoration is an effective measure to control water and soil erosion because of the changes in reaction interfaces in forests, such as canopy structure, floor cover and soil characteristics, and thus affecting the rainfall erosion processes. Therefore, this study makes a systematic review of the relevant research results at domestic and abroad. From the research perspectives of vegetation canopy structure (canopy and understory vegetation), floor cover (litter and biological soil crust) and soil properties (root system, microorganism and aggregate) to reduce rainfall erosivity and enhance soil erosion resistance, this study analyzed the processes and underlying mechanisms of forest vegetation restoration on water and soil erosion, and put forward the existing problems and research trends. It is very important to deeply understand the regulation mechanisms of forest vegetation restoration on water and soil erosion and improve the soil and water conservation benefits of forest in mountainous and hilly area in southern China.

Keywords: vegetation restoration; runoff; soil erosion; microbe; regulating mechanism; mountainous and hilly area

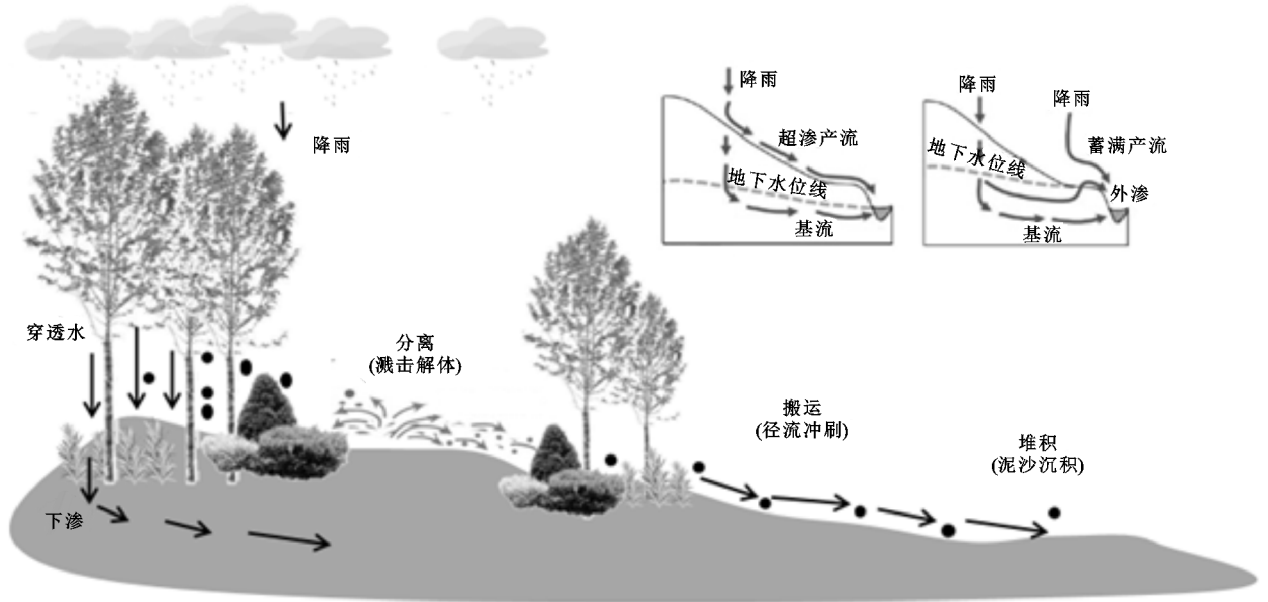
水土流失是全球普遍关注的重大环境问题之一,它造成土壤养分流失和土地退化,导致水质下降、河道与水库堵塞,对生物多样性、生态系统养分和碳循环、土地生产力和人类福祉产生较大影响^[1-2]。由于

收稿日期:2021-04-24
资助项目:国家自然科学基金项目(31870431,32071561);湖南省教育厅优秀青年基金项目(19B586)
第一作者:欧阳帅(1986—),男,博士,副教授,主要从事森林生态学和生态水文研究。E-mail:yangshuai8613@163.com
通信作者:项文化(1967—),男,博士,教授,主要从事生态系统生态和森林生态系统长期定位研究。E-mail:xiangwh2005@163.com

全球气候变化、人类活动及其相关的土地利用变化,加剧了水土流失^[3]。2001—2012 年,全球土壤侵蚀量增加 3.5%,为 35.9 Pg/yr^[2]。联合国可持续发展目标明确提出促进土壤资源保护和到 2030 年实现土地零退化的内容^[4]。《全国水土保持规划》(2015—2030 年)^[5]指出,我国水土流失面积 294.91 万 km²,占陆地面积的 30.7%,严重的水土流失威胁国家生态

安全、防洪安全、饮水安全和粮食安全,制约社会经济的可持续发展。

水土流失的发生是在外营力(如水力、风力等)作用于土壤,克服土壤颗粒间的胶结力、植物根系固结力和静摩擦力等反作用力,通过土壤颗粒分离、搬运和沉积 3 个阶段^[6],引起水的损失和土壤侵蚀的现象(图 1)。



注:右上角为地表径流产生过程。

图 1 水土流失过程与森林植被的调控作用

水土流失具体指水力作用下的土壤侵蚀^[7-8],后面这 2 个概念会交叉使用,反映指标有地表径流量、泥沙输出量和养分(碳、氮、磷)输出量。影响土壤水力侵蚀的因素包括气候、土壤、植被、地形和土地管理等,其中植被是可人为调控的因素^[9]。森林植被通过不同方式影响水土流失过程:(1)林冠截留和地表覆盖改变降雨对土壤的溅击侵蚀力;(2)减少地表径流、滞缓流速,降低径流的冲蚀力;(3)改善土壤结构,增加土壤团聚体的黏合力和稳定性,提高水分入渗率、土壤抗蚀和抗冲性能,降低土壤的可侵蚀性;(4)通过根系网加固黏结土体,强化土壤的抗冲性和稳定性^[7,10]。因此,森林植被能改变降雨侵蚀力和土壤抗侵蚀力的对比关系,已普遍认为是防止水土流失的有效措施^[1]。但有研究^[11-12]表明,在亚热带地区由于树种组成和群落结构不同,森林对土壤侵蚀的影响存在空间差异,森林覆盖的流域泥沙输出量仍然较高。森林植被恢复过程中植物组成和群落结构发生明显变化,导致冠层结构、林下植被、地表凋落物覆盖和生物结皮等水土流失反应界面的差异,土壤特性及地下生态过程受到较大的改变。深入研究这些差异和变化如何调控水土流失过程,对揭示森林水源涵养、土壤保育、碳和养分循环等生态系统功能形成机理具有十分重要的科学意义。

我国南方山地丘陵区水热条件优越,森林类型多样,植被结构复杂,是我国“两屏三带”的重要组成部分和全国水土保持分区中八大重点区域之一,对长江经济带高质量发展和贯彻落实国家生态文明建设总体要求具有十分重要的作用。由于该区域是我国经济活动最活跃的地区,人为干扰强烈,加上地形复杂、气候多变,植被破坏严重,导致生物多样性锐减、暴雨洪灾频发、水土流失突出,生态安全保障功能脆弱。过去 20 多年来,我国政府先后实施了天然林保护、退耕还林(草)等林业生态建设工程。同时,一些地区经济的发展,对森林资源的依赖性降低,森林植被逐步得到恢复^[13]。理清该地区森林植被恢复对水土流失的调控机制,是区域森林植被建设和水土资源合理利用中的关键性问题,为评价国家林业生态工程建设的生态系统服务提供科学依据。

国内外已长期开展水土流失的监测和评估工作,研究水土流失产生的原因及其对生态系统服务的影响,是探索控制水土流失和生态恢复的有效途径^[14]。从水土流失涉及的物理过程来看,降雨与地表之间相互作用的一般规律性解释,其主要的影响因素(包括降雨强度、降雨时间和时空变化、土壤特性、地理条件、植被类型、土地利用和降雨前的土壤湿润状况等)

均较为清晰^[15]。但是,土壤侵蚀也是一个重要的生态过程^[16],把生态学原理整合到生物学成分如何影响物理过程的研究,能够提高我们对地球表面过程的理解。生物学成分(植物和土壤微生物)纳入土壤侵蚀的研究仍是一个挑战,涉及植物组成、生物多样性与生态系统功能(生物地球化学、地下生态过程、植物—微生物—土壤之间的反馈作用)、稳定性(土壤抗侵蚀力)之间的关系,属于当前地球科学和生态学研究的的前沿科学问题^[16]。同时,全球气候变化改变了降雨时空格局,暴雨发生频率增加,森林植被对水土流失的调控效应存在较大的不确定性,提高全球气候变化下植被恢复对水土流失调控作用的预测能力,是应对全球气候变化、构建暴雨灾害防控预警体系和维持区域生态安全的迫切需要^[2]。因此,本文对国内外近 20 年研究资料进行梳理,以森林植被恢复改变冠层结构、地表覆盖物和土壤性质等作用界面从而影响降雨侵蚀过程为研究视角,强调植物—土壤—微生物相互作用的地下生

态过程的调控机制,并提出目前研究中存在的主要问题及亟需开展的研究方向,期望能够提高对森林植被调控水土流失的预测能力,为解决土壤侵蚀与水土保持学科领域关键科学问题提供理论基础。

1 水土流失过程的基本要素及植被调控的复杂性

水土流失是降雨侵蚀力和土壤抗侵蚀力相互作用的结果,影响基本要素为降雨特征和土壤性质^[17](图 2)。降雨主要产生雨滴对土壤溅击侵蚀力和地表径流冲刷力^[18],与降雨特征(降雨量、降雨强度、降雨时间、雨滴大小分布、下落速度和能量)有关,其中降雨强度影响最大,特别是暴雨的降雨强度和降雨时间^[1]。但是,对雨水溅击侵蚀的全面研究需要考虑所有因素^[17]。然而,受可靠测定雨滴溅击侵蚀方法的限制,难以获得准确数据,加上溅击侵蚀过程的时空变化,降雨强度研究较多,直接测定雨滴直径分布和动能的研究相对较少。

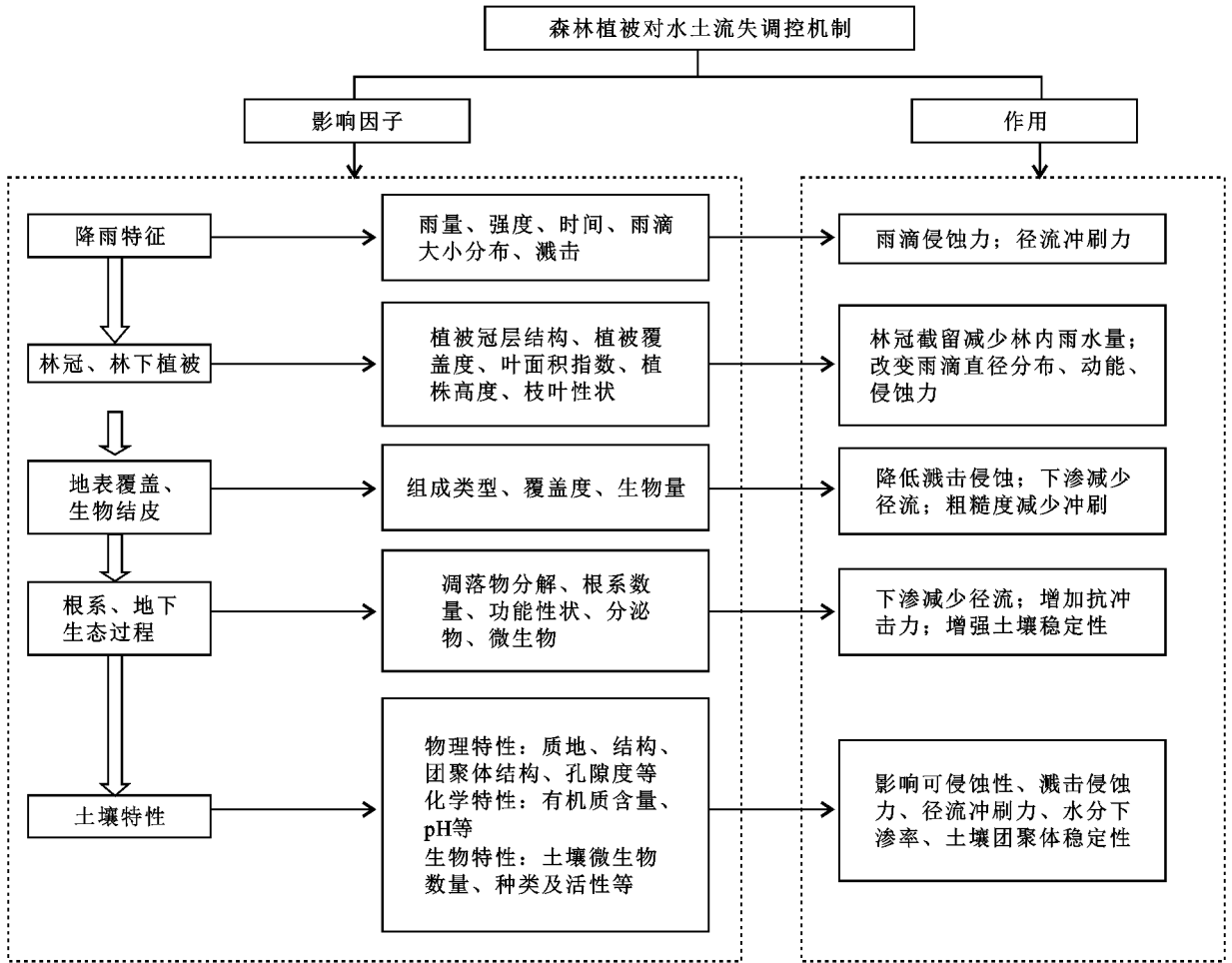


图 2 影响水土流失的基本要素和植被调控^[7]

土壤可侵蚀性为土壤对抗雨水溅击分散和地表径流冲刷搬运的能力。土壤质地、结构、石砾含量、有机质含量、团聚体稳定性、土壤剪切力和渗透性等特性影响土壤可侵蚀性^[17-18]。土壤质地组成中,砂粒对

侵蚀搬运的阻力大,黏粒对雨滴溅击分散的阻力大,粉粒的抗侵蚀力最弱。在理论上,用黏粒含量作为土壤可侵蚀性的指标,能反映与土壤有机质结合形成团聚体结构及其土壤稳定性。团聚体的大小和质

量决定雨滴溅击分散土粒能量的阈值^[19]。土壤下渗特性和水分状况影响地表径流产生(图 1),从而影响雨水冲刷和土粒的搬运。在土壤侵蚀事件发生的初期,土壤水分含量、气候状况和季节性变化也是需要重点考虑的因素^[20-21],这些因素影响水分下渗,同时土壤湿润减弱团聚体的黏合度,导致膨胀,降低团聚体稳定和土壤剪切力。由于森林植被的存在,降雨到达土壤表面之前,经过林冠、林下植被和地表覆盖 3 个作用界面,降雨和植被之间多重作用对土壤侵蚀产生多方面的影响(图 2)。

短期内改变进入林内降雨量、雨滴的溅击能量和地表径流冲刷力,长期内穿透水、树干茎流的化学特性影响养分循环和土壤特性^[22]。同时,森林植被中凋落物、地下根系、土壤微生物等生态过程改变土壤性质,特别是土壤有机质、团聚体结构和土壤力学特性。可见,降雨的时空变异、土壤生态学过程、森林植被变化之间相互影响,森林植被对水土流失调控作用十分复杂。目前缺乏对森林植被恢复的水土流失调控过程的全面认识和机理性的深入解释,制约了森林植被管理及其水土保持功能提升。

2 森林植被冠层和林下植被对降雨侵蚀力的消解作用

降雨与植物(林冠、林下)相互作用后,林冠截留减少进入林内的雨水数量,雨水到达地表途径(穿透水、树干流)、雨滴大小、下落速率和位置发生变化^[22-23]。雨水溅击使土壤颗粒分离是土壤侵蚀的第一步^[24],雨滴侵蚀力与林内雨滴大小、下落高度有关,这些均受群落特征、冠层构架、叶和枝特性的影响^[25-26],特别是树高和林冠盖度^[27]。

与普遍认识相反,由于冠层枝叶把小的雨滴汇集形成大的雨滴,与空旷地相比,从叶片掉下的雨滴直径增大,从而增加雨滴到达土壤表面的动能和溅击侵蚀力^[28-31]。不同树种林内穿透水的雨滴直径不同,在印度南部,加勒比松(*Pinus caribaea*)雨滴直径中值为 2.3 mm,赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)雨滴直径中值为 2.8 mm,柚木(*Tectona grandis*)雨滴直径中值为 4.2 mm^[32]。然而,并不是所有的树种都增加雨滴的大小和动能,由于叶面积指数及其树冠垂直分布状况不同,亚热带树种中无患子(*Sapindus saponaria*)叶面积指数分布在冠层上部,增加雨滴动能,石栎(*Lithocarpus glaber*)和木荷(*Schima superba*)向冠层下部分布,林冠截留量大,减少雨滴动能^[12]。可见,森林群落的树种组成和结构对降雨侵蚀力的影响较为复杂,还存在时间和空间的动态变化。

雨滴到达土壤表面的速率与植物高度有关,当下落高度为 0.2 m 时,雨滴下落速率(1.9 m/s)对土壤颗粒的溅击分离作用可忽略不计^[22],因此林下植被对雨滴侵蚀力的作用较大^[27]。此外,林分密度和管理对雨滴侵蚀的调控作用较大,尤其是在山坡上的人工林^[33-35]。林分密度高的人工林中,林内可利用光较低,经常导致地表裸露、林下灌木和草本较少^[30],雨滴侵蚀力比空旷期高几倍^[27]。

3 地表凋落物覆盖与生物结皮对土壤侵蚀的阻滞作用

地表覆盖的凋落物能截留降雨,减少雨滴对土壤溅击作用,增强土壤表面的粗糙度和渗透率,减少地表径流量和泥沙输出^[36],因此凋落物覆盖对土壤侵蚀的影响比冠层树木影响更大^[27,37]。造林后水土流失减少,凋落物覆盖发挥了重要作用^[38]。与裸地相比,凋落物覆盖 100% 时水土流失减少 82%,覆盖 60% 时减少 62%。当覆盖降低到 38%,对水土流失没有显著的调控作用^[36]。

虽然人们较早认识到森林中凋落物覆盖的作用,对凋落物类型和数量的持水量特性研究较多,但定量研究凋落物影响地表径流和土壤侵蚀过程的较少^[12]。不同树种的叶片形状、分解速率和持水特性不同,影响地表覆盖和地表径流。然而,当凋落物分解较快,特别土壤动物的作用,在春季到秋季高温多雨期间,空旷地表比例增加,导致土壤侵蚀增加^[36]。凋落物也可能过滤滞留溅击的土壤颗粒,使凋落物层堵塞土壤空隙,增加土壤侵蚀^[39-40]。

最近研究^[41-42]表明,不仅是干旱地区,而且在刚造林地,生物结皮对土壤侵蚀和水文过程十分重要。生物结皮的水力和机械特性极大地调控雨水的渗透、径流和蒸发。但是,生物结皮的影响程度和方向仍有较大的争论。在干旱地区,结构或物理性土壤结皮,降低渗透率,增加径流;另一方面,生物结皮能够产生微孔通道和增加表面粗糙度,减少地表径流,也可以截留泥沙来减少土壤侵蚀。在降雨期间,生物结皮内孔中高分子物质膨胀,封闭表面,阻挡地表径流^[43]。因此,生物结皮能稳定土壤表面,减少土壤侵蚀和土壤有机碳的流失^[44-45]。在黄土高原,不同生物结皮类型降低雨滴动能的效果不同,蓝细菌为主的生物结皮比苔藓为主的影响大,生物量增加其影响越大^[46]。不同生物结皮对土壤水力特征影响有差异,当疏水性聚合物比例增加和多糖物质的膨胀,降低了土壤空隙和入渗率^[42]。在亚热带森林中,生物结皮可能影响地表径流、土壤渗透和其他水文过程^[11,47]。

4 植物根系及地下生态过程对土壤抗侵蚀的稳固作用

由于植物组成不同和生长发育的变化,地上凋落物归还数量、组成和分解速率不同,土壤微生物组成、环境条件和地下根系周转也相应发生改变,导致土壤养分(碳、氮和磷)和有机质含量不同^[48-49],这些地下生态过程影响土壤性质、稳定性和可侵蚀性^[50-52]。同时,森林植被减少地表径流及其对土壤表层的侵蚀^[14,25],提高土壤有机质含量,改善土壤物理结构,也增强了土壤抗侵蚀能力^[14,53-54]。因此,森林植被、土壤特征及其抗侵蚀能力存在一个相互促进的反馈作用。

土壤团聚体作为土壤结构和功能的基本单元,其结构特征(粒径大小分布及稳定性等)影响着土壤的孔隙性、持水性、通透性和抗蚀性,对土壤水分移动、养分循环和微生物活动等具有重要意义^[51-52,55]。因此,土壤团聚体的稳定性很大程度上决定了土壤结构^[52,55]。团聚体具有不同的形态和大小,通常分大团聚体($>0.25\text{ mm}$)和微团聚体($<0.25\text{ mm}$)。根据水稳性又可以分为水稳态团聚体和非水稳态团聚体^[56]。土壤团聚体稳定性的评价指标包括 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径等^[50-52,57]。许多学者^[14,52,54]把土壤团聚体的水稳性作为评价土壤可蚀性的重要指标,通过提高土壤团聚体的水稳性以及水稳性团聚体的数量和质量来提高土壤抗侵蚀能力。已有研究^[14,52-54]表明,植被恢复可促进土壤团聚体结构的形成与稳定,而且侵蚀区植被恢复后,土壤水稳性团聚体及土壤孔隙度均得到明显提高。

土壤团聚体形成受物理、化学和生物因素的驱动,根际土壤是植物与微生物活动的重要场所^[51,55,57-58],植物根系及其分泌物对土壤团聚体的形成、稳定与周转过程中产生影响^[51],包括:(1)通过根系分泌物,把细颗粒土壤凝结成大的团聚体;(2)改变根系周围的环境,把与根平行的土壤颗粒拉在一起;(3)为土壤提供分解的有机残体;(4)根系支持大量的微生物种群;(5)为土壤动物提供食物;(6)增加溶液中离子浓度^[59-60]。有研究^[14,51,57]表明,大粒径土壤团聚体是小粒径土壤团聚体在植物根系和菌丝共同缠绕作用下形成,特别是植物细根能够提高大粒径团聚体的含量和土壤团聚体的总量,与根系分泌物能够加速黏结土壤颗粒有关。

很多研究^[59,61]注重植被覆盖对水土流失的影响,但忽视地下生态过程,尤其是植物根系功能性状对水土保持的作用研究相对较少。植物根系功能性状(根系密度、根长密度、根生物量、根表面积、根面积比)与土壤抗

侵蚀能力密切相关,在提高土壤剪切力和抗侵蚀的力学特性方面具有重要作用^[59,61]。通过穿透土壤,根系加强土壤张力和土壤切断张力^[62],根系与表面土壤颗粒黏结,增加土壤粗糙度,降低侵蚀。根系本身增加表面粗糙度和土壤渗透能力。已有研究^[63-65]表明,随根密度增加而指数增加,水侵蚀速率与植物根系生物量的关系可用指数方程描述。随着根长密度或根密度增加,细沟侵蚀呈指数下降^[63-65]。但是,植物根系直径的作用没有引起关注,土壤抗侵蚀能力受根系分布特别是 $>1\text{ mm}$ 直径根系分布的影响,细根(直径 $<3\text{ mm}$)比粗根更重要^[63],不同细根构型的侵蚀减少效应不同^[66-67]。

5 南方山地丘陵区森林植被恢复对地表径流和土壤侵蚀的调控效应

南方山地丘陵区森林植被恢复包括自然恢复和人工造林2种途径(图3)。其中,自然植被恢复是植物群落的正向演替^[68],该地区水热条件有利于植被自然恢复,森林是植被的主体^[69],包括灌草、针叶林(马尾松为优势树种)、落叶阔叶林和常绿阔叶林等阶段^[70];人工造林以杉木、马尾松等树种为主,如果没有人为干扰,马尾松林逐步按照自然演替,向常绿阔叶林方向发展,因此马尾松林列入森林植被的自然恢复系列进行研究。杉木人工林是南方速生用材树种,林分结构主要体现在随林龄的变化^[71]。

森林类型和林龄对土壤侵蚀量和地表径流量产生怎样的影响还存在争论^[72]。与幼龄林相比,成熟人工林的土壤侵蚀量和地表径流量下降,幼林阶段主要受草本植物的影响,成熟林则受凋落物的作用^[73]。尽管森林植被恢复总体上降低三峡库区的土壤侵蚀量,但不同恢复阶段的森林植被对土壤侵蚀调控效应存在较大差异^[74]。目前,对完整森林植被恢复阶段或年龄系列的土壤侵蚀和地表径流研究较少,缺乏带有方向性变化规律的总结。此外,土壤侵蚀模型,如通用土壤流失方程、改进通用土壤流失方程和水力侵蚀预测项目,以及遥感手段预测水土流失,均需要野外样地观测数据进行模型参数校正和验证^[1,75-76]。在南方山地丘陵区,更多野外径流样地观测获得的自然降雨条件下地表径流和土壤侵蚀数据,有利于提高森林植被恢复对水土流失调控效应的评价能力和预测流域土地利用变化造成水土流失的准确性。

土壤侵蚀因素存在时空变化^[77-78]。就土壤特性而言,土壤水分在小时内变化,容重、有机质和养分交换能力随着森林的生长阶段发生变化。同时,土壤可侵蚀性在不同空间尺度上变化,尤其是山区,坡度、土壤质地的

变化更为明显,即使在调查样地内,高程的变化也导致土壤侵蚀差异。可见,除树种组成和群落结构外,空间异质性需要考虑。对土壤侵蚀、动态、土壤稳定性和微气候的空间分析是一个重要研究内容。认识环境因素

的空间变异,建立土壤、植物群落、地下生物量、菌根、根系、地形和气候等因素的空间、时间数据,通过数据挖掘技术、景观模型和数字土壤制图的方法,是研究植被恢复对水土流失调控效应一种新的途径。

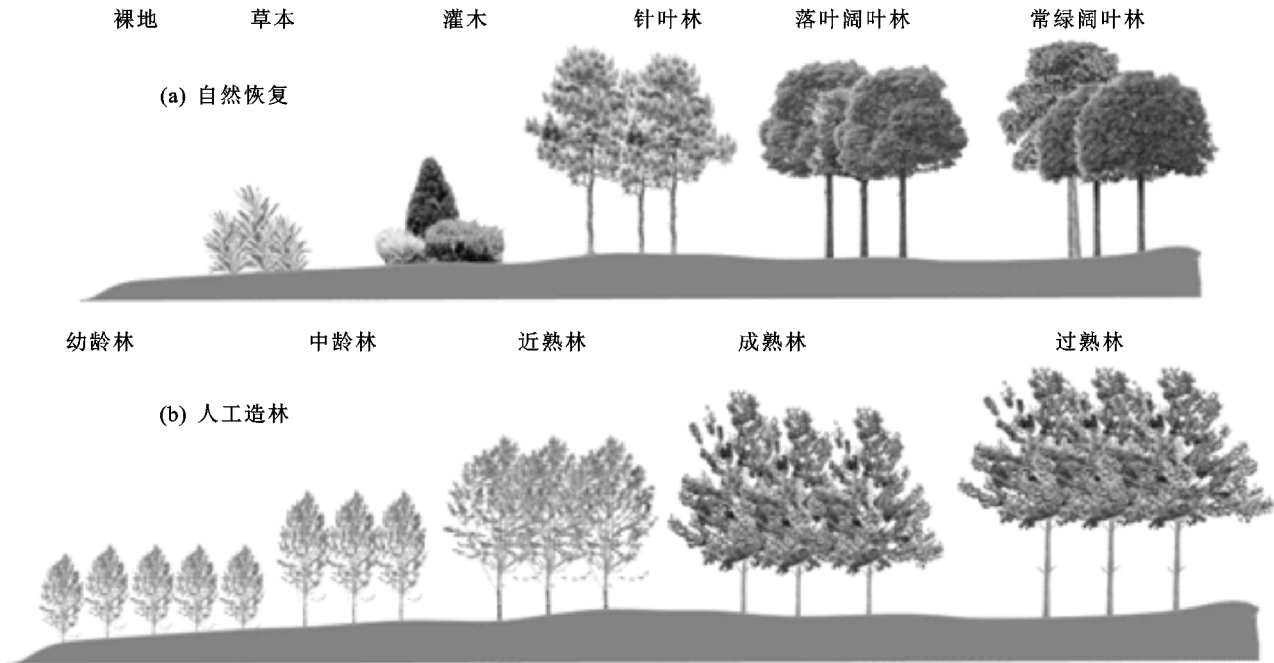


图 3 南方山地丘陵区森林植被自然恢复和人工造林示意

6 研究发展趋势及有待深入研究的问题

综合分析全国水土保持措施减少水土流失效果的结果表明,森林植被恢复是把土壤侵蚀降低到可持续经营水平的最佳措施^[79]。但是,从前面对水土流失过程的影响因素和森林植被调控效应的研究进展来看,森林植被恢复使水—土界面的相互作用变为水—土—生物界面的相互作用,调控水土流失过程更为复杂。在理论上,深入研究森林群落特征、降雨特征、土壤性质之间相互作用及其对降雨侵蚀力、土壤可侵蚀性的调控机理,仍是今后研究的重点和难点问题。在实践层面上,研究不同森林类型、植物之间相互作用、林下植被和凋落物管理对土壤侵蚀的影响,为水土保持措施的树种选择和配置、密度调控、林下植被和凋落物管理提供科学依据^[24]。国内已在黄土高原、西南干热地区、喀斯特地区的植被恢复对水土流失调控机理和措施等方面进行了较为系统的研究,南方山地丘陵区坡面水平的观测和研究相对较少^[11,73],今后还需要深入研究的内容包括:

(1)无论是人工造林还是森林植被的自然恢复,林分的树种组成不同。另外,随着森林生长发育,林分密度、树高、树冠构型(冠高、枝叶数量)、叶片功能性状(大小、落叶或常绿、比表叶面积)、林冠盖度、叶面积指数、林下植被等均会发生变化,今后需要进一步阐明森林植被恢复过程中这些因素的变化是如何

对水土流失产生影响。

(2)全球气候变化影响降雨格局的变化,极端降雨和暴雨事件增多,重点研究这些条件下林冠结构、林下植被、凋落物覆盖和生物结皮对降雨侵蚀力的影响,比较林下植被、凋落物去除后土壤侵蚀的变化,探讨减少水土流失的森林植被管理模式。

(3)冠层结构之间相互作用、地表凋落物覆盖、生物结皮与植物生长对土壤侵蚀影响复杂。尤其是在南方山地丘陵区,气候条件湿润,植被类型差异明显,森林植被恢复过程中地表凋落覆盖和生物结皮如何变化?这些变化对水土流失的调控作用如何?目前对这些问题仍缺乏量化和微观研究。把植物—土壤—微生物反馈作用连接起来,研究凋落物、植物根系、土壤微生物群落及多样性对土壤团聚体特征和土壤可侵蚀性的影响,揭示地下生态过程对土壤可侵蚀性的调控机理。

参考文献:

[1] Borrelli P, Alewell C, Alvarez P, et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: e146494.
[2] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017, 8: e2013.
[3] Panagos P, Katsoyiannis A. Soil erosion modelling: The

- new challenges as the result of policy developments in Europe[J].Environmental Research,2019,172:470-474.
- [4] Keesstra S D, Bouma J, Wallinga J, et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals[J].Soil, 2016,2(2):111-128.
- [5] 陈伟,王治国,张超.全国水土保持规划(2015—2030年)[Z]//中国水利水电勘测设计协会.水利水电工程勘测设计新技术应用.北京:中国水利水电出版社,2018.
- [6] 魏晓华,孙阁.流域生态系统过程与管理[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [7] Hao H X, Qin J H, Sun Z X, et al. Erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow under contrasting textured soils [J]. Catena, 2021, 203 (9): e105378.
- [8] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
- [9] 董林垚,郑艳霞,张平仓.气候变化对降雨侵蚀力的影响研究综述[J].长江科学院院报,2015,32(3):59-63.
- [10] Luo J, Zhou X L, Rubinato M, et al. Impact of multiple vegetation covers on surface runoff and sediment yield in the small basin of Nverzhai, Hunan Province, China[J].Forests,2020,11(3):329-347.
- [11] Song Z S, Seitz S, Li J, et al. Tree diversity reduced soil erosion by affecting tree canopy and biological soil crust development in a subtropical forest experiment [J].Forest Ecology and Management,2019,444:69-77.
- [12] Song Z S, Seitz S, Zhu P P, et al. Spatial distribution of LAI and its relationship with throughfall kinetic energy of common tree species in a Chinese subtropical forest plantation[J].Forest Ecology and Management, 2018,425:189-195.
- [13] 项文化,方晰.亚热带次生林群落结构与土壤特征[M].北京:科学出版社,2018.
- [14] Wang Y F, Yao S B. Effects of restoration practices on controlling soil and water losses in the Wei River Catchment,China: An estimation based on longitudinal field observations [J]. Forest Policy and Economics, 2019,100:120-128.
- [15] Wu L, Jiang J, Li G X, et al. Characteristics of pulsed runoff-erosion events under typical rainstorms in a small watershed on the Loess Plateau of China[J].Scientific Reports,2018,8:e3672.
- [16] Orgiazzi A, Panagos P. Soil biodiversity and soil erosion: It is time to get married: Adding an earthworm factor to soil erosion modelling[J].Global Ecology and Biogeography,2018,27(10):1155-1167.
- [17] Fernández-Ragaa M, Palencia C, Keesstra S, et al. Splash erosion: A review with unanswered questions [J].Earth-Science Reviews,2017,171:463-477.
- [18] Zambon N, Johannsen L L, Strauss P, et al. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall[J].Catena,2021,196:e104827.
- [19] Wang D, Li G L, Fu Y, et al. Detachment and transport characteristics of sandy loam soil by raindrop action in the northern Loess Plateau,China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2018,73(6):705-713.
- [20] Wang B, Zheng F L, Roemkens M J M, et al. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences[J].Geomorphology,2013,187:1-10.
- [21] Wang G Q, Fang Q Q, Wu B B, et al. Relationship between soil erodibility and modeled infiltration rate in different soils[J].Journal of Hydrology,2015,528:408-418.
- [22] Dunkerley D. A review of the effects of throughfall and stemflow on soil properties and soil erosion[M].Switzerland:Springer,2020.
- [23] Levia D F, Hudson S A, Llorens P, et al. Throughfall drop size distributions: A review and prospectus for future research [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water,2017,4(4):e1225.
- [24] 史志华,宋长青.土壤水蚀过程研究回顾[J].水土保持学报,2016,30(5):1-10.
- [25] Goebes P, Seitz S, Kuhn P, et al. Throughfall kinetic energy in young subtropical forests: Investigation on tree species richness effects and spatial variability [J].Agriculture and Forest Meteorology,2015,213:148-159.
- [26] Nanko K, Watanabe A, Hotta N, et al. Physical interpretation of the difference in drop size distributions of leaf drips among tree species[J].Agricultural and Forest Meteorology,2013,169:74-84.
- [27] Liu W J, Luo Q P, Lu H J, et al. The effect of litter layer on controlling surface runoff and erosion in rubber plantations on tropical mountain slopes,SW China [J].Catena,2017,149:167-175.
- [28] Geißler C, Lang A C, Von Oheimb G, et al. Impact of tree saplings on the kinetic energy of rainfall: The importance of stand density, species identity and tree architecture in subtropical forests in China[J].Agricultural and Forest Meteorology,2012,156:31-40.
- [29] Zhang W J, Liu W J, Li W X, et al. Characteristics of throughfall kinetic energy under the banana (*Musa nana Lour.*) canopy: The role of leaf shapes[J].Catena, 2021,197:e104985.
- [30] Nanko K, Mizugaki S, Onda Y. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities [J].Catena,2008,72:348-361.

- [31] Senn J A, Fassnacht F E, Eichel J, et al. A new concept for estimating the influence of vegetation on throughfall kinetic energy using aerial laser scanning [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45 (7): 1487-1498.
- [32] Calder I R, Hall R L, Prasanna K T. Hydrological impact of *Eucalyptus* plantation in India [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 150(2/4): 635-648.
- [33] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 等. 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质 [J]. *林业科学*, 2018, 54(10): 20-30.
- [34] Razafindrabe B, He B, Inoue S, et al. The role of forest stand density in controlling soil erosion: Implications to sediment-related disasters in Japan [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160: 337-354.
- [35] 李宗勋, 李启艳, 侯晓龙, 等. 不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 27-33.
- [36] Seitz S, Goebes P, Zumstein P, et al. The influence of leaf litter diversity and soil fauna on initial soil erosion in subtropical forests [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(11): 1439-1447.
- [37] Sepúlveda R B, Carrillo A A. Soil erosion and erosion thresholds in an agroforestry system of coffee (*Coffea arabica*) and mixed shade trees (*Inga spp* and *Musa spp*) in Northern Nicaragua [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 210: 25-35.
- [38] Im S, Lee J, Kuraji K, et al. Soil conservation service curve number determination for forest cover using rainfall and runoff data in experimental forests [J]. *Journal of Forest Research*, 2020, 25(4): 204-213.
- [39] Guzha A C, Rufino M C, Okoth S, et al. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 15: 49-67.
- [40] Valentin C, Agus F, Alamban R, et al. Runoff and sediment losses from 27 upland catchments in South-east Asia: Impact of rapid land use changes and conservation practices [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 128(4): 225-238.
- [41] De Jong S M, Addink E A, Van Beek L P H, et al. Physical characterization, spectral response and remotely sensed mapping of Mediterranean soil surface crusts [J]. *Catena*, 2011, 86: 24-35.
- [42] Li S, Bowker M A, Xiao B. Biocrusts enhance non-rainfall water deposition and alter its distribution in dryland soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: e126050.
- [43] Fischer T, Veste M, Wiehe W, et al. Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbial crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany [J]. *Catena*, 2010, 80: 47-52.
- [44] Bullard J E, Ockelford A, Strong C, et al. Effects of cyanobacterial soil crusts on surface roughness and splash erosion [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(12): 3697-3712.
- [45] Chamizo S, Rodríguez-Caballero E, Román J R, et al. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall [J]. *Catena*, 2017, 148: 117-125.
- [46] 秦宁强, 赵允格. 生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2259-2264.
- [47] Song Z S, Seitz S, Li J, et al. Tree diversity reduced soil erosion by affecting tree canopy and biological soil crust development in a subtropical forest experiment [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 444: 69-77.
- [48] Cortés-Calderón S, Mora F, Arreola-Villa F, et al. Ecosystem services supply and interactions along secondary tropical dry forests succession [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: e118858.
- [49] Poorter L, Bongers F, Rozendaal D M A. Biomass resilience of Neotropical secondary forests [J]. *Nature*, 2016, 530(7589): 211-214.
- [50] Deng L, Kim D G, Peng C H, et al. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China [J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29: 3974-3984.
- [51] Liu R Q, Zhou X H, Wang J W, et al. Differential magnitude of rhizosphere effects on soil aggregation at three stages of subtropical secondary forest successions [J]. *Plant and Soil*, 2019, 436(1/2): 365-380.
- [52] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2018, 325: 18-27.
- [53] 黄俊, 金平伟, 姜学兵, 等. 南方红壤区植被覆盖因子估算模型构建与验证 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 106-114.
- [54] 钱婧, 张丽萍, 王文艳. 红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性 [J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1590-1599.
- [55] Ali H E, Reineking B, Münkemüller T. Effects of plant functional traits on soil stability: Intraspecific variability matters [J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1/2): 359-375.
- [56] Garcia L, Damour G, Gary C, et al. Trait-based approach for agroecology: Contribution of service crop root traits to explain soil aggregate stability in vineyards [J]. *Plant and Soil*, 2018, 435(1/2): 1-14.
- [57] Demenois J, Rey F, Ibanez T, et al. Linkages between

- root traits, soil fungi and aggregate stability in tropical plant communities along a successional vegetation gradient[J]. *Plant and Soil*, 2018, 424(9): 319-334.
- [58] Erktan A, Cécillon L, Graf F, et al. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics[J]. *Plant and Soil*, 2016, 398(1/2): 121-137.
- [59] Gould I J, Quinton J N, Weigelt A, et al. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands[J]. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1140-1149.
- [60] Zuazo V H D, Pleguezuelo C R R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review[J]. *Sustainable Agriculture*, 2008, 28: 65-86.
- [61] 李强, 杨俊诚, 张加琼, 等. 植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(1): 17-23.
- [62] 王晶, 赵文武, 刘月, 等. 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J]. *生态学报*, 2019, 39(9): 3355-3364.
- [63] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(2): 189-217.
- [64] Hao H X, Di H Y, Jiao X, et al. Fine roots benefit soil physical properties key to mitigate soil detachment capacity following the restoration of eroded land[J]. *Plant and Soil*, 2020, 446(1/2): 487-501.
- [65] Smith D J, Wynn-Thompson T M, Williams M A, et al. Do roots bind soil? Comparing the physical and biological role of plant roots in fluvial streambank erosion: A mini-JET study[J]. *Geomorphology*, 2021, 375: e107523.
- [66] 金晓, 陈丽华. 晋西黄土区不同植被类型土壤抗冲性及表层根系分布特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 120-126.
- [67] Wang X H, Ma C, Wang Y Q, et al. Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: Variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root-soil composite[J]. *Landslides*, 2020, 17: 1965-1977.
- [68] 宋永昌, 陈小勇. 中国东部常绿阔叶林生态系统退化机制与生态恢复[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [69] Ren Y J, Lü Y H, Fu B J, et al. Biodiversity and ecosystem functional enhancement by forest restoration: A Meta-analysis in China[J]. *Land Degradation and Developments*, 2017, 28(7): 2062-2073.
- [70] Xiang W H, Zhou J, Ouyang S, et al. Species-specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in southern China[J]. *European Journal of Forest Research*, 2016, 135(5): 963-979.
- [71] Wu H L, Xiang W H, Ouyang S, et al. Tree growth rate and soil nutrient status determine the shift in nutrient-use strategy of Chinese fir plantations along a chronosequence[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 460: e117896.
- [72] Filoso S, Bezerra M O, Weiss K C B, et al. Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review[J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0183210.
- [73] Sun D, Zhang W X, Lin Y B, et al. Soil erosion and water retention varies with plantation type and age[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 422: 1-10.
- [74] Teng M J, Huang C B, Wang P C, et al. Impacts of forest restoration on soil erosion in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 697: e134164.
- [75] Guo Q K, Hao Y F, Liu B Y. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data[J]. *Catena*, 2015, 124: 68-76.
- [76] Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): e4175.
- [77] Wang X H, Wang B T, Xu X Y, et al. Spatial and temporal variations in surface soil moisture and vegetation cover in the Loess Plateau from 2000 to 2015[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 95(1): 320-330.
- [78] Geng R, Zhang G H, Ma Q H, et al. Effects of landscape positions on soil resistance to rill erosion in a small catchment on the Loess Plateau[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 160: 95-108.
- [79] Zhao J L, Yang Z Q, Govers G. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: Evidence from erosion plot data[J]. *Geoderma*, 2018, 337: 729-741.