

植被与水土流失关系研究进展

徐宪立^{1,2}, 马克明^{1,*}, 傅伯杰¹, 刘宪春³, 黄 勇^{1,2}, 祁建^{1,2}

(1. 城市与区域生态国家重点实验室 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053)

摘要: 水土流失是世界性的环境问题之一, 对人类社会可持续发展构成威胁, 控制水土流失成为迫切需要, 有许多水土流失控制措施, 而生物措施尤其植被一直是人们研究的焦点。根据前人的研究, 从斑块、坡面和流域/区域尺度总结了植被与水土流失的关系。斑块尺度植被对降雨和径流侵蚀能量具有很大的减弱或消除作用, 可以改变植株底部的土壤性质, 改善其结构, 进而降低土壤可蚀性, 增加入渗能力, 从而减轻土壤侵蚀程度。不同植被类型、植被的不同层次结构, 不同植被的形态结构具有不同的土壤侵蚀控制作用。坡面尺度主要从坡位、坡度、坡向对植被生长和分布格局的影响、对水土流失过程和格局的影响以及裸地-植被镶嵌格局、植被的条带格局对水土流失的影响和反映水土流失过程的景观格局指数的构建等方面进行了研究。更多是从植被恢复及其水土流失效应方面进行了探讨, 为退化生态系统恢复和格局设计提供了极其有用的信息。流域/区域尺度植被与水土流失的关系更大程度上受到气候、地貌特征的影响, 因此研究多从一定气候条件控制的土地覆盖(植被覆盖)及其格局的水土流失效应方面进行的。由于大尺度监测非常困难, 研究多从遥感监测、GIS 集成和模型模拟方面开展, 是流域、区域等大尺度生态安全格局设计的有力支持。前人的研究为生态环境建设和保护提供了大量参考信息, 但仍有一些问题需要进一步探讨, 对此进行了初步的概括和归纳, 希望能够对植被和水土流失关系的研究起到一定促进作用。

关键词: 植被; 水土流失; 尺度

文章编号: 1000-0933(2006)09-3137-07 **中图分类号:** Q948, S154.1 **文献标识码:** A

Research review of the relationship between vegetation and soil loss

XU Xian-Li^{1,2}, MA Ke-Ming^{1,*}, FU Bo-Jie¹, LIU Xian-Chun³, HUANG Yong^{1,2}, QI Jian^{1,2} (1. State Key Lab of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. The Monitoring Center of Soil and Water Conservation Ministry of Water Resource, Beijing 100053, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 3137 ~ 3143.

Abstract: Soil loss is one of the world's most critical environmental problems, and presents a key challenge to human sustainable development. So it is vital to understand how to control soil loss. There are many soil conservation measures, in which plant cover has been given special attention. According to previous research, the relationship between vegetation and soil loss was generalized through the three scales of patch, hillslope and watershed/region. At the patch scale, vegetation can greatly reduce or eliminate the energy from rainfall and runoff flow. It also can improve soil properties and soil structure under vegetation, and then decrease soil erodibility and increase infiltration capacity to reduce soil loss. In addition, vegetation types, vegetation structures and vegetation morphology also have direct influences on soil loss. At the hillslope scale, research has focused mainly on such aspects as the influence of slope position, slope degree and slope aspect on vegetation growth and distribution patterns. Other issues discussed include soil loss processes and patterns, influences of bare soil-vegetation mosaics and banded vegetation patterns on soil loss, and designing indices indicating runoff and soil loss processes and patterns. Most authors studied vegetation restoration and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40571005); 国家自然科学基金委员会创新群体资助项目(40321101)

收稿日期: 2006-02-28; **修订日期:** 2006-08-16

作者简介: 徐宪立(1978~), 男, 山东人, 博士生, 主要从事景观生态与土壤侵蚀研究。E-mail: xuxianli@sohu.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mkm@rcees.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40571005, No. 40321101)

Received date: 2006-02-28; **Accepted date:** 2006-08-16

Biography: XU Xian-Li, Ph. D. candidate, mainly engaged in landscape and soil erosion. E-mail: xuxianli@sohu.com

its effects on soil loss, and provide much valuable information on degraded ecosystem restoration and ecological security pattern design. At the watershed/region scale, the relationship between vegetation and soil loss is mainly controlled by climate and geomorphology characteristics, thus most studies concentrate on aspects of land cover (vegetation cover) and its effects on soil loss. Because of the difficulty in making observations at a large scale, remote sensing monitoring, GIS integration and model simulation are the main subjects and they can greatly help design regional ecological security pattern. In general, the previous research provides a large quantity of available knowledge for ecological conservation and environmental protection, however, there still exist some deficiencies, which need much more investigation. These deficiencies are analyzed so as to make suggestions for future studies on the relationship between vegetation and soil loss.

Key words: vegetation; soil loss; scale

水土流失是世界性的环境问题之一,它使土地退化,生产力下降,生态环境恶化,对人类社会可持续发展构成威胁,减缓或控制水土流失一直是世界性的课题,对水土流失的控制有许多措施,而生物措施尤其植被更是人们关注的焦点。

植被与水土流失的关系一直是人们研究的重要内容。多数研究认为增加植被覆盖是控制水土流失的重要举措,不同的植被类型及其搭配组合控制水土流失的效益不同,且裸地与植被镶嵌构筑成水土流失的源-汇格局,合理的镶嵌格局可以保持水分、养分和植物种子,有利于植被的生长,进一步增强水土流失控制能力。这也说明要想有效控制水土流失,首先要合理的选择植物物种及其搭配,也要合理的设计植被空间分布格局,这就成为景观生态学中景观要素和景观格局与生态过程关系的研究。而植被与水土流失过程的关系随着尺度的不同又会发生变化,增加了其复杂性,构成了一个等级体系,要想达到有效控制水土流失的目的,必须从斑块、坡面到流域区域甚至全球的尺度理解两者之间的相互作用机制。等级理论指出高层次制约低层次,而低层次为高层次提供机制和功能^[1],各个层次之间相互联系,相互影响,因此,必须从上而下和自下而上的对植被-土壤侵蚀整个层次体系深入探索,才能真正理解两者的内在关系。

本文从斑块、坡面和流域/区域三级尺度回顾了植被与水土流失关系的研究,既可为植被恢复和水土流失控制提供参考,也会加深景观生态学中格局-过程-尺度关系的理解。

1 研究进展综述

1.1 单株植被/斑块尺度

大量研究表明,植被是土壤侵蚀的重要影响因素,主要包括植被类型、植被覆盖度、植被枯枝落叶层,植被根系的影响也引起了很大的关注。植被的垂直结构,形态结构更是影响土壤侵蚀的重要因素^[2~4]。

植被覆盖度的增加会拦截降雨,降低降雨能量,进而减少降雨侵蚀力,覆盖度对土壤侵蚀的影响关系,有些用直线形式或指数形式来表达,很多研究也探讨了有效植被盖度的问题^[5],认为只有达到一定盖度之后才能起到减轻土壤侵蚀的作用。另外,植被高度的变化也会影响植被覆盖度与土壤侵蚀之间的关系,研究表明只有在一定高度下,植被覆盖度才能有效的减少降雨能量,植被过高其冠层汇集的雨滴能量更大,对地表的溅蚀更强^[6]。大量研究表明,植被枯枝落叶层是控制土壤侵蚀的重要因素^[7]。它覆盖在土壤表面形成保护层,保护土壤免受或减轻雨滴的直接打击以及对土壤的剥离。它还可以有效的拦截地表径流,减缓其流速,减弱其剥蚀能量,减少细沟或切沟侵蚀发生的机会。

植被能够改善表土的土壤结构、物理化学和水文性质^[8]以及微地形,这些性质的改变会进一步影响水土流失,如降低土壤可蚀性、增加土壤入渗能力。Bochet 等人^[9]对 3 种常绿有刺灌丛研究发现,植被对表土物理化学性质的影响由植株底部向外到裸土部分逐渐减弱,显著的改变植株底部的土壤性质,如增加了有机质,增强了团聚体稳定性,降低了容重、渗透阻力、石块的含量及其覆盖面积。Thompson 等人^[10]在 Mojave 沙漠地区通过采样分析了土壤的有机质、全氮、氮矿化和重量含水量等性质,表明 3 种灌丛植被下的量要高于植被之间裸地的含量。Ziegler 和 Gambelluca^[11]在 Kaho Olawe 岛测定了土壤的物理和水文性质,评价了植被恢复对产流和加速侵蚀的影响,饱和导水率和土壤吸附力的数据证明植被恢复区和裸地区入渗能力有显著差异。植被

斑块分布通常伴有坡面上微地形的改变,往往在植株上坡向形成小土堆,从而打破了坡面的连续性。Bochet 等人^[13]在地中海地区的研究得出了这样的结果,同时表明植被类型对微地形的发展起到了主导作用,坡度也对土堆的形态起到了一定的影响作用。值得注意的是,一些生态过程如侵蚀、泥沙输移、生物扰动对土堆的形成也起到了积极的作用,尤其不同形态的植被与这些过程具有不同的交互作用,因而对土堆形态的影响比较复杂。宋述军等人^[14]研究表明坡度越大,沉积物堆积高度越大,微地形越明显且不同植物之间的微地形有明显差异。

回顾以往的研究,其注意力主要集中在植被的地上部分,往往忽略植物根系的影响。而 Gyssels 等人^[15]在比利时黄土带研究表明增加播种密度显著改变了沟蚀形态,极大的减少了土壤流失量。通过增加播种密度来加倍根系质量在整个生长季平均减少了 42 % 的土壤流失。在冬季,黑麦的根系是土壤流失减少的主要控制因素,可以达到 53 %,说明秧苗根系在植被生长的早期阶段对土壤侵蚀起到了更重要的控制作用。而且与传统播种相比,增加播种密度不会明显减少粮食产量。Gyssels 和 Poesen^[16]通过比较谷类作物和草类植被不同密度下的沟蚀横断面(包括细沟和浅沟)发现根系密度和秧苗密度一样与侵蚀速率的数学关系呈负指数形式。尤其在植物生长初期,根系更是起到了重要的控制作用,因此提高根系密度是重要的控制措施。中国学者李勇等人^[17,18]较早的开展了植被根系对土壤侵蚀影响的研究。

从以上分析可以看出,植被从地上部分的冠层到地下部分的根系,都对水土流失有着直接或者间接的作用,实际上反映了植被的垂直结构对土壤侵蚀的影响。不同的植被类型,有不同的分层结构,各个层次的形态等特征也有显著差异,进而对水土流失的影响会有不同。针对单株植被的小环境,Bochet 等人^[19]以植株为中心向外到裸地,对表土性质和溅蚀进行了观测,对比了半干旱地区 3 种常绿有刺灌丛植被的减蚀效果,结果表明它们的减流减沙方式有所不同。冠层相对稠密的 *Stipa* 草丛,具有屏蔽效应,削弱了降雨侵蚀力,减少了溅蚀;*Rosmarinus* 除了其冠层和地表枯枝落叶的机械保护作用以外,还有枯枝落叶层对植株底部表土结构和性质的改善,主要是枯枝落叶增加了表土的有机质,因此,*Rosmarinus* 底部的枯枝落叶成为控制侵蚀的主导因素;而对于 *Anthyllis* 这种落叶型的灌丛,对降雨能量的削减作用并不明显。Casermeiro 等人^[20]在西班牙马德里对 29 个自然小区进行了模拟降雨观测,结果表明植被盖度是主要的减流减蚀因子。植被的结构也很重要,尤其具有分层结构的植被群落比单层植被更能保护土壤,减轻水蚀程度。植被生长形态也具有一定的作用。矮高位芽植物 *Rosmarinus* 对控制侵蚀最有效。而生物多样性没有表现出明显的保护土壤的作用。Gonzalez Hidalgo 等人^[21]在西班牙内陆选择两个试验点,分析了植被覆盖和泥沙输移的关系,结果表明植被的个体结构,以及植被之间的组合搭配是泥沙输移的重要影响因子,控制着侵蚀的过程和格局。

斑块尺度的研究表明要想有效的控制水土流失,必须结合当地环境条件合理选择物种及其搭配,尤其要注意植被的垂直结构和形态特征。

1.2 坡面尺度

坡面是地理过程发生发展的重要地理单元,也是流域/区域的基本构成单元。坡面的物质构成和坡面上物质和能量的流动一直是生态学家、地理学家研究的重要对象,尤其土壤侵蚀研究一直把注意力放在坡面上,而且对坡面的观测具有可操作性,是数据的重要来源。许多侵蚀预报模型都是以坡面为基础发展起来的,包括经验模型 RUSLE/USLE (Revised/Universal Soil Loss Equation) 和物理模型 WEPP (Water Erosion Prediction Project)。

坡面的坡度、坡向以及土壤性质对植被生长和分布格局都有很大的影响作用,对产流和土壤侵蚀也有着直接影响,坡面上的植被类型、植被在坡面上的位置对水土流失也有直接的控制作用,而水土流失过程和格局又反过来影响植被生长和分布。Bergkamp^[22]在西班牙中部研究了 *Quercus ilex* 和 *Q. coccifera* 的相对恢复程度,并将它与不同坡位的水文特征和过程相联系。结果表明,相同坡位的地理生态系统北坡比南坡的恢复力强。退化相对较重的灌丛,在下坡位具有更高的植被覆盖,表明生态系统在下坡位比上坡位具有更强的恢复力。Durán Zuazo^[23]在西班牙东南部,布设了不同植被类型(*Rosmarinus*, *Triticum aestivum* 和自然演替植被)的径流

小区。3a 的观测表明,与 *Triticum aestivum* 相比, *Rosmarinus* 和自然植被减蚀分别为 99 %和 98 %,减流分别为 94 %和 96 %,而且 *Rosmarinus* 和自然植被截雨量也大于 *Triticum aestivum*。Sanchez 等人^[24]在委内瑞拉安第斯山地区用径流小区法选择 4 种植被类型对土壤侵蚀进行了定量研究,结果表明不同植被类型及其管理措施对土壤侵蚀的影响程度不同。Cerdeña^[25]在西班牙东南部山区的人工降雨试验研究表明极端降雨条件下坡位对侵蚀速率没有影响;由于局部的高入渗特征,使得在整个坡面尺度上没有产流;坡面内植被是土壤侵蚀和产流的最重要控制因素。Lopez-Bermudez 等人^[26]在西班牙 Murcia 利用径流小区研究了地中海半干旱气候下的土壤侵蚀与植被之间的关系。两年的观测结果表明,在常绿带刺灌丛的控制下,山坡尺度的产流和土壤流失量较低。Fullen^[27]在英国 Shropshire 布设了 10 个径流观测小区,用以分析草地的产流侵蚀效应对土壤有机质的影响。结果表明,伴随着草地覆盖的增加,侵蚀速率在不断降低。侵蚀速率与坡度没有很好的相关性,说明即使在陡坡条件下这种措施也起到了有效的作用。在植草措施小区里土壤有机质显著增加,2a 后平均 0.39 %,4a 后平均 0.78 %。土壤可蚀性显著降低,试验证明将裸地植草是一种有效的水保措施。

植被的存在往往影响侵蚀产沙过程,影响侵蚀运移的土壤颗粒组成。Martinez-Mena 等人^[28]在西班牙东南部,建立了两种径流小区,一种是自然植被覆盖,另一种人工除去自然植被(扰动小区)。通过 4a 的泥沙取样,表明两种小区的径流对泥沙的运输都具有选择性。植被覆盖对泥沙的粒径分布有显著的影响,尤其在高雨强的降雨事件中更为明显。最大 30min 降雨强度 I_{30} 在 40mm/h 处是扰动小区产沙粒径分布产生变化的临界值,超过这个值后,团聚体被破坏,径流中携带的砂粒将会增加 10 %~20 %,而有植被覆盖的小区产沙粒径没有随雨强变化而变化。自然植被小区中,植被会减少 50 %的产生侵蚀的降雨能量,75 %的产生径流的能量,阻止了团聚体的破坏,以及粗颗粒的运移。并且指出对有植被覆盖的小区,雨滴是主要的侵蚀因子,而对无植被覆盖的小区,雨滴和径流都是侵蚀的动力。

近年来许多研究表明水分和泥沙的源-汇植被驱动格局与坡面物质流动协同发展,调控着坡面上物质的空间配置^[29]。Reid 等人^[30]根据植被覆盖的不同将斑块分成 3 种类型,冠层斑块(在木本植被冠层正下方)、冠层斑块之间的植被斑块、冠层斑块之间的裸露斑块。裸露斑块的产流和侵蚀速率最高,其次是冠层之间的植被斑块,最小的是冠层斑块。结果表明,对产流和产沙而言,3 种不同的斑块类型起到了不同的作用,裸露斑块起到了源的作用,而其他两种斑块类型起到了汇的作用,在较小尺度下,这种径流和泥沙的输移过程具有重要的生态意义(可以获取水源)。格局控制过程,过程影响格局,格局与过程是景观生态学研究的核心内容之一,构建反映生态过程的格局指数一直是景观生态学家的重要研究方向。Imeson 和 Prinsen^[31]认为裸地-植被镶嵌格局可以指示水土流失源-汇格局的幅度、空间分布和连通性,提出了 4 种景观格局指数,用来表征水土流失格局和过程,将景观格局和由其控制的生态过程联系起来。

干旱和半干旱地区的带状景观特征也引起了许多学者的关注。带状景观由植被条带和裸地相间排列沿着等高线在坡度较缓(0.2 %~2 %)和相对均一的坡面上分布。植被条带可能与主风向正交,更多的情况下与坡面正交。Valentin 等人^[32]研究表明,在既定的气候条件下,坡度是控制格局(点状,宽的或典型的带状)类型的重要因子。既定坡度条件下,年降雨量控制着植被与裸地之间的差异程度,也控制着条带的长度、植被带之间裸地与植被带宽度的比率。这种坡面二相镶嵌的典型样带格局形成产流-聚流系统,有利于捕获有限的水资源,因此带状格局下的生物量往往高于点状或单一散乱分布格局。而且,植被条带成为自然屏障限制了土壤侵蚀。模型模拟显示,裸地表面和稠密植被格局都可以演替发展成带状格局。带状格局是干旱半干旱地区植被恢复格局设计的最佳选择,可以提高生物量,限制土地退化。Rey^[33]研究了低矮植被主要是草本和小灌木对上坡来水来沙的拦截作用,指出坡面底部的植被屏障覆盖仅仅达到 20 %的时候就可以有效的拦截上坡来沙。Martínez Raya 等人^[34]在西班牙东南部通过四年的径流小区观测,指出植被条带能够有效的减少径流和侵蚀,而且不同植被类型效果不同。Bergkamp^[35]从 5 个尺度对产流、植被格局和微地形的相互关系进行了研究,自然降雨监测和模拟降雨的结果表明局部的高入渗特征使得坡面尺度没有产流,坡面和流域与更小尺度的产流没有形成连接。并且按照等级理论讨论了维持坡面上这种镶嵌结构和产流过程对管理地中海灌丛坡

面的意义。

坡面尺度的不同植被类型、裸地-植被斑块镶嵌格局、植被的条带格局对坡面生态管理具有重要意义,尤其在干旱半干旱地区,是坡面植被恢复格局设计的重要参考。

2.3 流域/区域尺度

流域/区域尺度植被与环境因子、与水土流失的关系更加复杂,更多的受到了气候、地貌特征的影响。因此多数研究是从不同气候条件下不同地貌部位的植被及其分布格局、不同植被(土地)覆盖类型及其格局的水土流失效应方面进行探讨。

Guerreiro-Campo 等人^[36]在西班牙东北部通过植被调查发现,海拔高度和坡向决定了植物群落的空间格局,这些格局与土壤和土壤侵蚀特征以及某些植被特征有紧密的联系。较高的多年生植被控制着谷底,灌丛主要控制着山坡和山顶。有效水分、土壤深度和土壤颗粒的下移决定了这种植被隔离格局。许炯心^[37]和 Xu^[38]以黄土高原为例研究了降雨-植被-侵蚀的关系,找出了对植被覆盖度和土壤侵蚀强度及其两者关系有很大影响的临界降雨量,为植被恢复和生态建设提供了重要依据。另外,许多研究也表明流域尺度的植被空间变异对水土流失过程和格局会产生很大影响,加上降雨的时空变异使得二者之间关系更加复杂。

由于大尺度调查的难度,遥感和地理信息系统技术成为获取和分析数据的重要手段,许多研究根据植被光谱特征提出了反映植被覆盖度的植被指数,并构建植被与环境因子的关系模型,土壤侵蚀预报模型中植被指数的参数化也是重要的研究内容。为了服务于流域/区域管理,许多研究提出了流域/区域水土流失预报模型,用于模拟不同土地利用/覆盖情景下的水土流失效应。流域水土流失预报与评价模型可以作为景观格局优化设计的重要工具,使得格局与过程紧密联系起来,可以深化对景观生态学的认识。基于数据的可获得性和模型的简单易用性,经验模型得到了很快的发展和广泛应用。Van Rompaey 等人^[39]引入了 SEDEM 模型(Sediment Delivery Model),在 RUSLE 土壤侵蚀预报模型的基础上加入了泥沙输移的模拟,较好的预测了输入河流的泥沙量,并且可以模拟土壤侵蚀与泥沙沉积的空间分布。此模型可以模拟不同土地利用/覆盖格局和水土保持措施的水土流失效应,在其他地区的应用获得了很好的效果。Fernandez 等人^[40]以及 Fu 和 McCool^[41]将 RUSLE、SEDD(Sediment Delivery Distributed)和 GIS 相结合,对流域的土壤侵蚀及泥沙输移路径进行了模拟,可以用于模拟不同土地覆盖情景下的水土流失效应。虽然流域模型得到很大程度的发展,但总体来讲,大尺度的水土流失预测尤其空间分布格局的预测仍然是一个热点也是个难点,需要进一步深入的探讨。

流域/区域尺度的研究更多的是对一定气候条件控制下土地(植被)覆盖-水土流失效应方面的探讨,尤其土地覆盖水土流失效应预测模型更是流域/区域管理的迫切需要,可以为土地利用类型选择及格局规划和设计提供服务。

尺度不同决定了研究方法的差异。上述研究中,坡面及以下尺度主要使用了定点采样、室内试验、小区监测等方法,而在流域/区域尺度主要采用站点(水文、降雨)监测、遥感监测、GIS 分析和数学模拟等方法。

3 问题与展望

针对植被与水土流失关系进行了大量研究,其成果为植被恢复和水土流失控制提供了宝贵的参考资料,但仍有一些问题需要进一步探讨。植被根系是土壤侵蚀重要的控制因素,由于其具有隐蔽性,研究相对较少,其控制机理仍然不明朗,需要加强。生物多样性是生态系统退化程度的重要度量指标,一直是生态学研究的重要内容,需要将其与水土流失联系起来进行研究。植被和水土流失过程共同改变着坡面的微地形,而微地形的改变进而影响着植被格局、水土流失格局与过程,因此,应该加强研究,尤其在中国这方面的研究相对较少。以往的研究主要集中在植被对水土流失的控制上,而水土流失对植被及其格局有何影响需要加强研究,这样就可以深化理解两者的关系,为植被恢复和水土流失防治提供参考。干旱半干旱地区的裸地-植被镶嵌格局具有重要的生态意义,尤其生态安全格局概念的提出^[42],更需要了解这种镶嵌格局的动态变化及其影响因素以及这种镶嵌格局的生态意义,尤其在中国这方面的研究更少。格局与过程紧密相联,前人的研究集中在对格局的简单描述上,构建反映生态过程的景观(植被覆盖)格局指数成为景观生态学的研究热点,如何构

建反映径流和泥沙输移过程的景观(植被覆盖)格局指数是未来重要的发展方向。大尺度生态现象和生态过程很难观测,必须依靠先进的手段,遥感的发展带来了福音,如何进行大尺度的生态遥感调查和监测是今后加强的重点,更为重要的是要加强模型模拟的研究,构建适合大尺度的水土流失预报模型为景观格局优化提供依据。由于小尺度观测的方便性并且积累了大量的数据,尺度转换仍然是重要的手段,是将来的重要研究内容之一。理论指导实践,实践也需要上升为理论,多数研究仍然处于个案研究、方法试验上,如何将其上升为理论,尤其植被与水土流失的关系在不同的层次体系上具有不同的表现特征,从景观生态学的等级理论更加深入的理解是极其重要的。

References:

- [1] Wu J W. Landscape — concepts and theories. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(1): 42 ~ 52.
- [2] Zhang G H, Liang Y M. A summary of impact of vegetation coverage on soil and water conservation benefit. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(2): 104 ~ 110.
- [3] Wang H S, Liu G B. Analyses on vegetation structures and their controlling soil erosion. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(2): 62 ~ 68.
- [4] Li P, Li Z B, Zheng L Y. Advances in researches of the effectiveness for vegetation conserving soil and water. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(2): 76 ~ 80.
- [5] Jiao J Y, Wang W Z, Li J. Effective cover rate of woodland grassland for soil and water conservation. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 608 ~ 612.
- [6] Chen Y Z. Papers collection on the source of the coarse sediment in the middle Yellow River and the mechanism of erosion and sediment production. Beijing: Meteorology Press, 1989.
- [7] Wang Y K, Wu Q X, Zhao H Y, *et al.* Mechanism on anti-scouring of forest litter. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 7(1): 75 ~ 80.
- [8] Zha X, Tang K L, Zhang K L, *et al.* The impacts of Vegetation on soil characteristics and soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(2): 52 ~ 59.
- [9] Bochet E, Rubio J L, Poesen J. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain. *Catena*, 1999, 38: 23 ~ 44.
- [10] Thompson D B, Walker L R, Landau F H, Stark L R. The influence of elevation, shrub species, and biological soil crust on fertile islands in the Mojave Desert, USA. *Journal of Arid Environment*, 2005, 61: 609 ~ 629.
- [11] Ziegler A D, Gambelluca T W. Influence of revegetation efforts on hydrologic response and erosion, Kaho Olawe Island, Hawaii. *Land Degradation & Development*, 1998, 9: 189 ~ 206.
- [12] Andreu V, Rubio J L, Gimeno-Garcia E, Llinares J V. Testing three Mediterranean shrub species in runoff reduction and sediment transport. *Soil & Tillage Research*, 1998, 45: 441 ~ 454.
- [13] Bochet E, Poesen J, Rubio J L. Mound development as an interaction of individual plants with soil, water erosion and sedimentation processes on slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25: 847 ~ 867.
- [14] Song S J, Li H X, Zhang J G. Microtopography structure study of individual plants on Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(1): 106 ~ 109.
- [15] Gysels G, Poesen J, Nachtergaele J, Govers G. The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones. *Soil & Tillage Research*, 2002, 64: 189 ~ 201.
- [16] Gysels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28: 371 ~ 384.
- [17] Li Y, Zhu X M, Tian J Y. Study on the effectiveness of soil anti-scourability by plant roots in Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(12): 935 ~ 938.
- [18] Li Y. Vegetation root and soil anti-scourability in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1995.
- [19] Bochet E, Rubio J L, Poesen J. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology*, 1998, 23: 139 ~ 150.
- [20] Casermeiro M A, Molina J A, de la Cruz Caravaca M T, Hernando Costa J, *et al.* Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena*, 2004, 57: 91 ~ 107.
- [21] Gonzalez Hidalgo J C, Raventos J, Echevarria M T. Comparison of sediment ratio curves for plants with different architectures. *Catena*, 1997, 29: 333 ~ 340.
- [22] Bergkamp G. Hydrological influences on the resilience of *Quercus* spp. Dominated geoecosystems in central Spain. *Geomorphology*, 1998, 23: 101 ~ 126.
- [23] Durán Zuazo V H. Impact of vegetation cover on runoff and soil erosion at hillslope scale in Lanjaron, Spain. *The Environmentalist*, 2004, 24: 39 ~ 48.
- [24] Sanchez L A, Ataroff M, Lopez R. Soil erosion under different vegetation covers in the Venezuelan Andes. *The Environmentalist*, 2002, 22: 161 ~ 172.
- [25] Cerda A. The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope.

- Hydrological Processes, 1998, 12: 661 ~ 671.
- [26] Lopez-Bermudez F, Romero-Diaz A, Martinez-Fernandez J. Vegetation and soil erosion under a semi-arid Mediterranean climate: a case study from Murcia (Spain). *Geomorphology*, 1998, 24: 51 ~ 58.
- [27] Fullen M A. Effects of grass ley set aside on runoff, erosion and soil organic matter levels in sandy soils in east shropshire, UK. *Soil & Tillage Research*, 1998, 46: 41 ~ 49.
- [28] Martinez-Mena M, Alvarez Rogel J, Albaladejo J, Castillo V M. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment. *Catena*, 1999, 38: 175 ~ 190.
- [29] Puigdefabregas J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30: 133 ~ 147.
- [30] Reid K D, Wilcox B P, Breshears D D, Macdonald L. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1869 ~ 1879.
- [31] Imeson A C, Prinsen H A M. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004, 104: 333 ~ 340.
- [32] Valentin C, d'Herbes J M, Poesen J. Soil and water components of banded vegetation patterns. *Catena*, 1999, 37: 1 ~ 24.
- [33] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29: 1161 ~ 1169.
- [34] Mart íez Raya A, Dur á n Zuazo V H, Francia Mart íez J R. Soil erosion and runoff response to plant-cover strips on semiarid slopes (SE Spain). *Land Degradation and Development*, 2006, 17(1): 1 ~ 11.
- [35] Bergkamp G. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena*, 1998, 33: 201 ~ 220.
- [36] Guerrero-Campo J, Alberto F, Hodgson J, Garcia-Ruiz J M, *et al.* Plant community patterns in a gypsum area of NE Spain. Interactions with topographic factors and soil erosion. *Journal of Arid Environment*, 1999, 41: 401 ~ 410.
- [37] Xu J X. Thresholds in vegetation-precipitation relationship and the implications in restoration of vegetation on the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1233 ~ 1239.
- [38] Xu J X. Precipitation-vegetation coupling and its influence on erosion on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2005, 64: 103 ~ 116.
- [39] Van Rompaey A J J, Verstraeten G, Van Oost K, Govers G, *et al.* Modeling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26: 1221 ~ 1236.
- [40] Fernandez C, Wu J Q, McCool D K, *et al.* Estimating water erosion and sediment erosion with GIS, RUSLE and SEDD. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(3): 128 ~ 136.
- [41] Fu G, Chen S, McCool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil eroision and sediment yield with RUSLE, SEDD and Arcview GIS. *Soil & Tillage Research*, 2006, 85: 38 ~ 49.
- [42] Ma K M, Fu B J, Li X Y, Guan W B. The regional pattern for ecological security (RPES): concepts and theoretical base. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 762 ~ 768.

参考文献:

- [1] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 42 ~ 52.
- [2] 张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述. *水土保持研究*, 1996, 3(2): 104 ~ 110.
- [3] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析. *干旱区资源与环境*, 1999, 13(2): 62 ~ 68.
- [4] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 植被保持水土有效性研究进展. *水土保持研究*, 2002, 9(2): 76 ~ 80.
- [5] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 608 ~ 612.
- [6] 陈永宗主编. 黄河粗泥沙来源及其侵蚀产沙机理研究文集. 北京: 气象出版社, 1989.
- [7] 汪有科, 吴钦孝, 赵鸿雁, 等. 林地枯落物抗冲机理研究. *水土保持学报*, 1993, 7(1): 75 ~ 80.
- [8] 查轩, 唐克丽, 张科利, 等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究. *水土保持学报*, 1992, 6(2): 52 ~ 59.
- [14] 宋述军, 李辉霞, 张建国. 黄土高原坡地单株植物下的微地形研究. *山地学报*, 2003, 21(1): 106 ~ 109.
- [17] 李勇, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性. *科学通报*, 1991, 36(12): 935 ~ 938.
- [18] 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性. 北京: 科学出版社, 1995.
- [37] 许炯心. 黄土高原植被—降水关系的临界现象及其在植被建设中的意义. *生态学报*, 2005, 25(6): 1233 ~ 1239.
- [42] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4): 762 ~ 768.