

植被与水土流失研究综述

张清春^{1,2}, 刘宝元¹, 翟 刚²

(1 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875; 2 国土资源部土地整理中心, 北京 100035)

摘 要: 植被作为影响水土流失的一个重要因子一直受到人们的广泛关注, 从植被变化指标的观测、植被不同部位在水土流失中的作用以及不同植被类型在控制水土流失中的效益三方面对植被与水土流失的关系研究进行了回顾总结, 并在此基础上提出上述研究领域的不足和将来的研究前景。

关键词: 植被; 植被变化; 水土流失; 综述

中图分类号: S1.57

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2002)04-0096-06

Review on Relationship Between Vegetation and Soil and Water Loss

ZHANG Qing-chun^{1,2}, LIU Bao-yuan¹, ZHAI Gang²

(1 Department of Resources and Environment Science, Beijing Teachers University, Beijing 100875, China;

2 Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract Vegetation as one of the main factors responsible for soil and water loss has ever since been widely attracting attention from the world. This review consists of three aspects such as the investigation of vegetation changes, the different impacts on soil and water loss from different parts of vegetation and the comprehensive contribution to reducing soil and water loss by diverse vegetation types. Some problems are concluded from the previous research and potential and valuable research needed to work on are proposed.

Key words: vegetation; vegetation change; soil and water loss; review

今天, 人们几乎已经普遍认识到, 水土流失直接破坏着水土资源这一人类生存和发展的重要物质基础和农业生产的基本条件, 已成为许多国家的严重灾害和全球性的环境问题。人们在认识和研究水土流失的过程中, 很早就发现植被对水土流失的控制作用; 德国土壤学家沃伦(Wollny)在1877年至1895年间完成的第一个侵蚀科学实验研究中, 就用试验小区观测到了植被和地面覆盖物对防止降雨侵蚀和土壤结构恶化的影响^[1]。后来, 埃利森(Ellison)认识到植被的保护作用是由于它使降雨雨滴丧失了动能^[1]。利森的这一发现从本质上揭示了植被控制水土流失的关键所在, 为土壤侵蚀科学开辟出了一个新的领域^[1]。植被在水土流失中的作用。从而揭示了人类研究植被与水土流失关系以及生物措施控制水土流失的序幕。

降雨是侵蚀发生的动力来源。简单的说, 降雨侵蚀是降雨与土壤之间的直接作用, 由于植被的介入, 使降雨在到达地面前后都受到了植被的影响, 从而使降雨与土壤之间的作用加入了间接的过程, 改变了裸地的降雨、水文过程(见图

1、图2)。

1 与水土流失有关的植被参数测量方法

在研究评价植被与水土流失关系过程中, 常用的几个植被参数包括植被覆盖度(Coverage)、叶面积指数(Lai)、植被冠层高度(Canopy height)、有效根密度(Effective density of roots)。

1.1 植被覆盖度

植被覆盖度当今研究植被与水土流失关系中用得最多的一个参数, 它是指单位土地面积上植被垂直覆盖面积所占的百分比, 常用百分数表示, 取值范围是0~100%。

植物学家和生态学家倾向于采用基部覆盖即植被的主茎所占地面的实际地表面积作为植被覆盖测量的原则^[2]。这类测量方法包括线截法、轮点法和变量小区法^[2]。然而, 为了研究土壤侵蚀, 更需要的是弄清被覆盖地面的比例, 即使这种被覆盖地面还有一定距离。

目前最简单的测量方法是目估法, 一般先选定一定面积

* 收稿日期: 2002-02-25

基金项目: 国土资源部重点资助项目(西部典型区土地整理生态评价的指标体系和方法; 批准号: 2000301)。

作者简介: 张清春, 男, (1973-), 山东寿光人, 硕士, 2000年毕业于北京师范大学资源与环境学系, 研究方向为土地利用与土壤侵蚀, 现在国土资源部土地整理中心国际合作与科技处工作。

大小的样方(如 1 m × 1 m), 然后借助经验来判断选定面积范围内植被覆盖所占的比例, 这种方法虽然简单, 但误差较大, 适用范围很窄; 现代航空遥感摄影技术虽是资源调查的有用方法, 但却不能提供确定植被覆盖所需的详细结果, 同时, 由于在植物生长季节内多次重复观测, 这种方法代价太高^[2]; 垂直照相法因为伸展面积看起来大于实际值, 即使是

立体拍摄, 所得植被覆盖百分数总是偏低, 对于覆盖度的纵向比较可能是有用的^[2]。

目前, 直接测量植被覆盖运用较广、代价较低、操作简易且实用价值较高的方法主要有正方形视点框架法^[2, 3]、阴影法^[4, 5]、点测法^[6]。

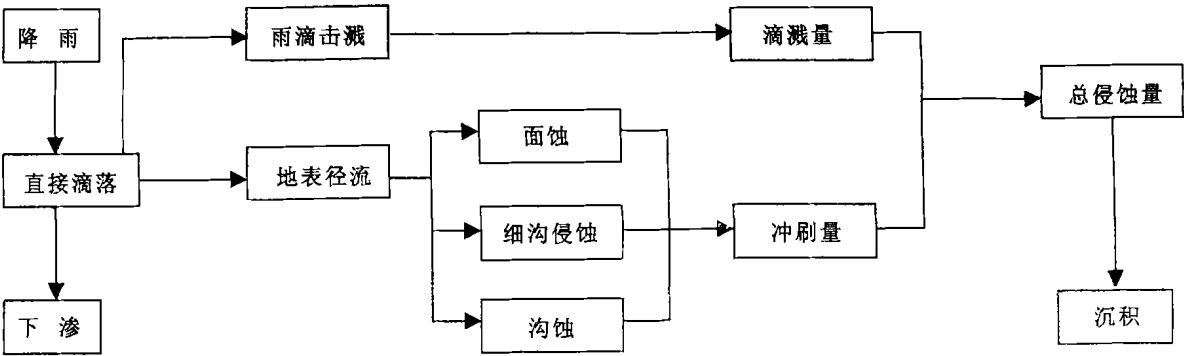


图 1 裸地降雨, 水文过程

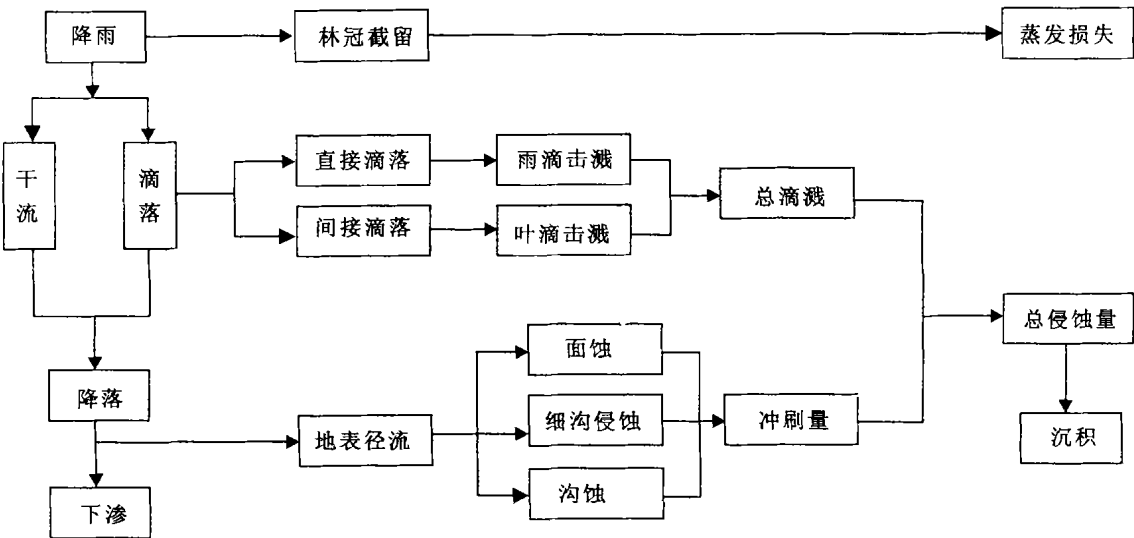


图 2 其植被覆盖地的降雨、水文过程

正方形视点框架^[2, 3] (如图 3) 的最简单形式由两根水平杆组成, 这两根水平杆上下对齐固定, 在每根杆上等间距钻 10 个小孔, 观测者从上面那根杆的小孔向下看, 透过下面那根杆的相应小孔可以看到小块地面, 观测者只需记录叶子或植被遮挡的其它项目出现与否, 观测结果看到目标的小孔数量占测量小孔总数的百分比表示。这种方法的误差来源于看成作物时的光偏移、高于 1 m 作物直视的困难、视点被部分掩盖问题及阴影重叠时的判断困难。为了提高精度, 现在已设计出一种改进的装置来测量植被覆盖, 这种装置保留了简单视点法的易操作性, 排除了一些光偏移和潜在误差, 并且还可以测量高秆植物如玉米。另外, 这种新装置不需垂直向下观测, 观测者通过装在游标尺上的枪瞄准器向下斜视到一面窄条镜子上, 可以看到天空背景下作物叶子的反射影像。

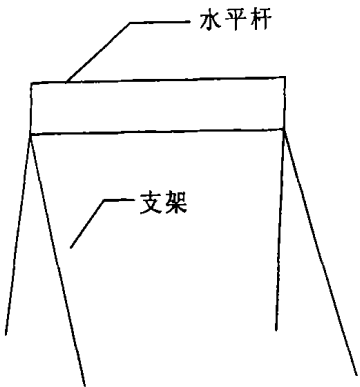


图 3 视点框架示意图

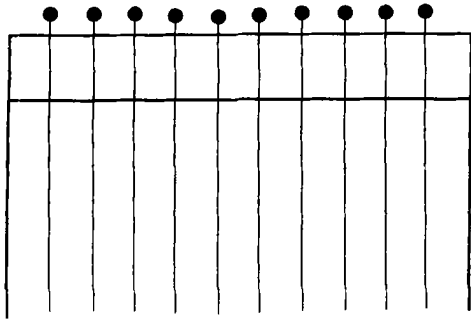


图4 点测式盖度仪结构示意图

阴影法^[4,5]是根据植被截留太阳可见光原理设计的,即通过测量地面上植被的阴影面积占地面面积的百分比来获得植被覆盖度,为了保证测量精度,这种方法要求在太阳高度角为90°时测量,以尽量测得植被在地面上的垂直投影。这种方法一般只适用于行播作物覆盖度的测量,测量时,把一根标有厘米刻度的1 m长杆平行于作物于两行之间的地面上,然后读取杆上植被投影的总长度(cm),从行间距的一端开始,每隔5 cm读取一次,直到行间距的另一端;如果行距为100 cm,则可获得21个数据, L_1, L_2, \dots, L_{21} ,植被覆盖度的计算公式为:

$$C(\%) = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{21}}{100 \times 21} \times 100$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{21} L_i}{100 \times 21} \times 100$$

一般计算公式为:

$$C(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{100 \times n} \times 100$$

式中: n ——测量次数; C ——植被覆盖度; L_i ——第 i 个阴影长读数。

这种测量方法在无太阳光的情况下无法使用,并且对测量时间的要求较高。

点测法^[6]是随着生态学的发展而出现的新的测量方法,在国外尤其在英国和新西兰普遍作为草地盖度的调查方法。它的调查原理是用一根根尖锐的铁针,由草冠垂直放下,记录接触植物枝叶的针数,一般所用仪器的示意图如图4所示。针与针间距离为10 cm,一排并列10根针,每根针均能自由的上下移动,最终的覆盖度为接触植物枝叶的针数与总针数之比的百分数。为了提高精度,一般测量多次求取平均值。

估计植被覆盖度的方法还有网格法^[7]、照度计法^[2]、全接点法^[2]等,由于这些方法适用范围窄、误差较大且不易操作,在此就不再逐一介绍了。

植被覆盖度除上述直接测量方法外,还可间接测得;间接测量法一般通过测量与植被覆盖度紧密相关的其它变量值来获得,或者是比直接测量简单,或者是具有更高的精确度;常见的方法主要有干物质法^[8]、叶面积指数法^[5]、击溅杯测土壤分离法^[9]等,这些方法目前常用来检测或校正其它方法的有效性,因其用起来比较复杂而很少能得到广泛应

用。

1.2 叶面积指数(LAI)

叶面积指数是指单位土地面积上所有植被叶片单面面积总和,为无量纲参数;它在求取植被光截留量和降雨截留量中得到广泛应用。但它的测量却相当困难,相对于覆盖度的测量来说既耗时间又耗钱财。常见的直接测量法叶面积法和仪器法,叶面积法是指直接测量叶子的面积(一般用面积仪或扫描法)来获得叶面积指数,即所谓的传统测量法;这种方法一方面需破坏植被,另一方面测量速度太慢,因而很难得到广泛应用。在实践中一般结合目测估算法^[10]一起操作,但精度很难得到保证。仪器测量法又包括顶视法和底视法^[11],顶视法即用传感器从上向下测量,遥感方法就属于这种,其原理是利用地物的反射光谱;底视法是传感器从下向上测量,其优点是适合于对高大森林的测量,无需遥感平台。仪器测量法尤其是底视法测量速度快,精度高,不失为一种首选LAI测量方法。

另外,LAI还可通过间接测量法获得。即通过测量较容易获得的其它变量值,回归求得它与LAI的关系式,从而在以后的LAI测量中通过其它变量的测量间接获得。常用的方法有:线性测量法^[12]、截留降雨法^[13]、干物质法^[12,14]和茎干长度^[12]等。

1.3 植被高度

植被高度主要影响叶滴击溅侵蚀量,作物高度的增加有可能使雨滴聚合后降落地面,对土壤的击溅作用会抵消甚至超过作物截留对土壤的保护作用^[2]。测量项目有植被的绝对高度和植被冠层高度,植被的绝对高度是指从地面到植被最顶端的长度,植被的冠层高度是指从地面到最低分枝的长度,对阔叶植物来说,它的冠层高度应是叶滴从叶片到地面轨迹的长度^[15]。

1.4 有效根密度

有效根密度是土壤剖面中100 cm²截面上对土壤抗冲性有增强效应的小于或等于1 mm径级须根的根数,单位为根/100 cm²^[16]。测量方法采用大型挖掘剖面壁法^[17]。

2 植被与水土流失关系的研究现状

研究植被与径流、泥沙关系的最终目的是为了揭示植被与水土流失之间的内在本质规律,增强植被在控制水土流失方面的作用,为农业的可持续性发展服务。综观前人的研究,我们可以从两方面加以概括:

2.1 植被影响水土流失的结构研究

植被在水土流失过程中对土壤可蚀性的影响是多环节多层次的(参见图2),就其可能性来讲,可以包括以下几个方面:

(1) 植被截留降雨; (2) 植被叶滴击溅; (3) 植被拦滤径流、泥沙; (4) 植被根系增强土壤抗蚀性; (5) 植被枯枝落叶层对土壤的保护作用。

人类认识植被对水土流失的影响是从植被截留降雨开始的^[2]。很显然,植被通过拦截雨滴和无害吸收它们的动能而保护土壤免于侵蚀。德国人沃伦^[2](Ewold Wolny, 1890)

最早对雨滴的阻隔进行了研究, 他发现植被截留量的大小取决于植被覆盖类型和种植密度。由于植被截留降雨是植被介入水土流失, 决定滴溅侵蚀和地表径流并进行影响冲蚀的首要环节, 因而人们对它的研究也就相对较多。

国内研究倾向于林冠截留量的定量评估和林冠截留在水土流失研究中作用的定性解释, 史立新等^[18]研究指出小到中雨条件下, 植被的截留作用更加明显, 这与卫正新^[19]的结论相一致。随着降雨量的增加, 林冠的截留是损失率减小, 降雨量与截留损失量之间呈幂函数反相关关系。杨新民^[20]在分析 2 年的小区观测资料后指出, 在降雨过程中, 林冠截留量随着降雨量的增加而增大, 而后又随着降雨量的增加而逐渐趋于稳定并最终达到饱和。这种变化趋势用仪垂祥等^[21]所建立的植被截留降水量公式可以得到表示:

$$E_i = \frac{\sigma \cdot P \cdot P^*}{E_i^* \cdot P > P^*}$$

式中: E_i ——植被截留降水量; σ ——最大截留系数, 它等于植被盖度; P ——降水量; P^* ——植被达到最大截留量的临界降水量; E_i^* ——最大截留量。

1991 年陈廉杰^[22]把林冠截留与林冠的结构特征联系了起来, 他的结果是, 当林冠郁闭度小于 0.8 时, 随着郁闭度的增大, 林冠截留量增大, 而当郁闭度大于 0.8 时, 随着郁闭度的增大, 林冠截留量减小。

国外在植被截留降水量方面从宏观到微观做了相当全面的研究, 尤其是在微观方面研究更多。丸山岩三^[23]在 1994 年研究森林的水土保持机能时提到了树冠的截留受林木种类、状况、叶量和叶型的影响; Teklehaimanot^[24]研究了林冠截留雨量与树间距之间的关系; Stanley 等人^[25]在研究热带雨林树冠截留能力时分析了树冠最大截留能力与树皮的光滑、粗糙之间的关系; Fahey^[26]把次暴雨量作为影响树冠截留损失大小的主要因子, 其它影响树冠截留损失大小的因子还有树冠截留量的蒸发速度和叶滴排水速度^[27]、叶面积指数^[28]等。

单从植被截留降雨来看, 植被对控制水土流失已经开始发挥有益作用, 但紧随而来的叶滴击溅作用又对这一作用的好坏提出了质疑^[2]。原因在于, 在叶片上重组合过的雨滴, 质量通常大于天然雨滴, 在降落到地表的过程中, 它们可能被充分地加速到具有一定的能量, 这种能量对滴溅侵蚀的影响是不应忽略的^[29~31]。1985 年 Morgan^[32]对不同作物的研究指出, 同样雨强情况下, 随着玉米冠层的生长扩大, 溅蚀量增大, 玉米在 90% 的覆盖度下, 溅蚀量是裸地的 1.5~2 倍, 而在同样覆盖度的大豆植株下, 强度为 40 mm/h 的降雨的观测结果与玉米类似, 但在其它强度 (50, 75 和 100 mm/h) 的降雨情况下, 90% 覆盖度的大豆冠层下溅蚀量只是裸地的 20%~60%。克汉^[33]在 1992 年的研究中指出, 随着作物高度的增加, 土壤流失量也增加, 当作物高度为 1 m 时, 土壤流失量和无作物覆盖情况下基本相同, 从作物茎秆上掉下的雨滴所增加的额外动能已完全抵消了作物对土壤的保护作用。周跃等^[34]1998 年对叶滴溅蚀研究的结论是, 在高强度的降雨早期和集中降雨的中期, 叶滴溅蚀作用不明显, 中期以后,

特别是在后期, 雨量充分但强度减弱, 叶滴溅蚀作用明显表现出来, 导致林中的滴溅量迅速上升, 超过了中期裸地的滴溅量, 并两倍于后期裸地的滴溅量。

降雨中未被截留的部分到达土壤表面经下渗后形成径流, 在这一环节中, 土壤流失量的多少与土壤抗蚀性、径流量的多少及径流速度有关。而植被恰恰具有减少径流的作用, 除上述植被冠层的截留贡献外, 这一作用还来自植被枯枝落叶层的吸水保水能力和提高土壤渗透性^[35, 23, 36], 植被强大的根系分布改善土壤结构, 增强了土壤的入渗性能^[37, 16], 植被减缓径流速度, 降低超渗产流机会^[38, 36, 39, 40]。另外, 植被象屏障一样一方面过滤大量泥沙, 另一方面通过减缓径流速度加快泥沙沉积, 减少地表径流对泥沙的输移能力^[35, 36, 39]。

以上提到的有关植被水土保持作用的研究很大一部分只注意到了其地上部分, 而植被地下部分对水土保持的贡献国内外都很少涉及。李勇等人^[41, 16, 17]做了大量有关植被根系改善土壤结构, 提高土壤渗透性和增强土壤抗冲蚀能力的调查研究, 结论主要有以下几个方面:

(1) 根系的减沙效应: 根系对土壤抗冲性的强化作用以根系的减沙效应来表征, 根系减沙效应的强弱可用减沙数系数 Φ 表示:

$$\Phi = \frac{\text{含根系土壤冲刷量减少值(g)}}{\text{无根系土壤冲刷量(g)}}$$

(2) 植物根系对提高土壤抗冲性的剖面特征: 在同一雨强 (0.5~4.0 mm/min) 下, 当冲刷坡度 20 时, 油松林根系在 0~60 cm 土层内的相同间隔 (10 cm) 层次中对土壤抗冲性的强化值无明显差异, 当坡度 > 20 时, 0~40 cm 土层内相同间隔层根系对土壤抗冲性的强化值不受坡度影响。

(3) 有效根密度越大, 根系稳定土壤结构的绝对值越大, 林龄越长, 根系稳定土壤结构的有效性越强。

2.2 植被影响水土流失的综合性研究

当前对植被在水土流失中的研究更多地停留在植被覆盖度控制土壤侵蚀的效能研究, 且又以林草地覆盖度与土壤侵蚀关系的研究为最多。主要有以下几个方面的结论。

首先是不同植被类型之间以及不同植被覆盖地与农地或裸地水土流失量之间的对比实验研究。侯喜禄等人^[41]1985 年的研究结果是在相同的土壤类型、降雨特征和坡度条件下, 柠条、刺槐林、沙打旺草地、天然草地与农地相比泥沙减少量分别为 99.9%、98.5%、94.7%、和 60.8%, 径流量分别比农地减少 99.6%、86.1%、81.5% 和 13.3%。刘元保等人^[42]1990 年得出了类似结论^[43], 并指出植被覆盖在较陡坡地上的减蚀效益更加明显。其他一些这方面的观测研究^[41, 20]都得到了类似的结论, 即植被覆盖地与农地、裸地相比具有较强的减少水土流失效益。Ghulam M. H.^[40]1989 年的研究证明了即有树冠又有低层覆盖的地块能取得比较高的减少水土流失效益。Ghulam M. H.^[40]1989 年的研究证明了既有树冠又有低层覆盖的地块能取得比较高的土壤保持功能, 反映了空间覆盖和地面覆盖的互补效应。

其次, 大量的研究结果得到了植被覆盖度与侵蚀量之间的相关关系。其中有的研究认为冲刷量 w 与林草地覆盖度 C 之间呈倒数关系^[7]: $w = -11.180 + 1099.801 \cdot (1/C)$ 。还

有的研究认为林地侵蚀量 Y 和林地覆盖度 X 之间存在二次多项式关系: $Y = 10377.89 - 271.65X + 1.78X^2$ 。而更多的统计回归结果表明土壤侵蚀量与植被量盖度之间为指数关系^{[6][45]}, 且似乎被多数人所认可。早在 1976 年爱尔兰和斯托克就提出了土壤流失量与作物被覆百分比间的指数关系为 $S = A \cdot \exp(BF)$, 其中 S 为土壤流失量, F 为作物盖度, A , B 为常数。与指数关系类似, 1997 年余新晓等人^[36]的研究认为小流域森林植被覆盖度 F 与土壤侵蚀量 M_s 之间存在幂函数相关关系: $M_s = C(1 - F)^{0.5774}$, 其中 C 为常数。虽然关系式形式不同, 但结果都认定植被盖度与侵蚀产沙量之间是负相关关系, 即随着植被覆盖度的增加, 小区的水土流失量减少^[12]。

此外, 有关有效植被盖度也有一定的研究, 郭忠升^[46]提出, 当某地的土壤形成速率与土壤流失速率达到平衡时, 则本地的土壤流失就不会破坏持续发展所要求的土地生产潜力, 此时的土壤流失量即为一般所说的土壤允许流失量^[7], 水土保持林的有效覆盖率为在一定的防护范围内土壤流失量等于允许流失量时的覆盖率。卞义宁等人^[47]据郭忠升提出的定义利用王秋生回归得出的侵蚀与被覆关系式计算出了黄土高原沟壑区水土保持林的有效覆盖率为 43.6%。

3 讨论

上述前人所做的研究基本上界定在用小区观测资料统计分析植被变化对径流和泥沙产生量的影响, 植被变化主要包括植被类型、植被不同生长阶段及植被的破坏和恢复所带

来的变化, 所采用的衡量指标主要是植被的覆盖度。但是, 植被对径流和泥沙的影响多环节多层次的, 仅用单维、水平方向的覆盖度变化来代表立体结构的植被在影响径流和泥沙方面的所有重要特征显然是不全面的; 另外, 对于植被不同生长阶段这一动态变化的研究存在很大欠缺, 目前的主要研究成果有侯喜禄^[48]对黄土丘陵区森林不同生长阶段水土保持效益的划分。这一研究是相当笼统粗略的, 较为细致的研究是张光辉等人^[6]在安塞用人工草地小区盖度的季节动态变化资料所做的, 存在的不足在于, 整个的研究过程都在人工降雨的控制之下, 对揭示植被的自然生长动态意义不大, 推广价值不高, 另外, 这项研究所观测的植被类型和指标较为单一。

小流域尺度上调查研究植被及其对径流、泥沙的影响与小区尺度上的研究相比具有自身的优势, 一方面, 小流域尺度上所观测到的植被变化尤其是年内动态变化模式与本流域特定的自然地理条件、耕作制度自成系统, 具有很大的稳定性, 甚至可以推广到自然地理条件和耕作制度相对一致的更大范围, 具有很高的实用价值和推广价值; 再者, 小流域尺度上的降雨、径流和泥沙年内变化分布研究受人为影响较小, 与年内植被的动态变化结合, 很大程度上可以揭示本流域与植被变化相关的径流、泥沙产生规律和年内分布规律。另外, 为了更准确地揭示植被变化规律及其对径流、泥沙的影响, 有必要增加衡量植被变化指标的观测, 从而尽可能全面地评价植被变化与径流、泥沙变化之间的关系。

参考文献

- [1] N. W. 哈德逊. 土壤保持(窦葆璋译)[M]. 北京: 科学出版社, 1975. 2—3
- [2] R. 拉尔. 土壤侵蚀研究方法(黄河水利委员会宣传出版中心译)[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 165
- [3] CacKett, K E. A simple device for measuring canopy cover[J]. Rhodesian Journal of Agricultural Research, 1964, 2(1): 56 - 57.
- [4] R O Hartwig, J M Laflen. A meterstick method for measuring crop residue cover[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1978, 33: 90- 91.
- [5] Adams, J E, G F Arkin. A light interception method for measuring row crop ground cover[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41: 789- 792
- [6] 张光辉, 梁一民. 黄土丘陵区人工草地盖度季节动态及其水保效益[J]. 水土保持通报, 1995, 15(2): 38- 43.
- [7] 罗伟祥, 白立强, 等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 30- 35
- [8] Ghebreyessus, Y R, J M Gregory. Crop canopy functions for soil erosion prediction[J]. Transaction of the ASAE, 1987, 30(3): 676- 682
- [9] Sreenivas, L, J R Johnston, H W Hill. Some relationships of vegetation and soil detachment in the erosion process[J]. Proceedings, Soil Science Society of America, 1947, 12: 471- 479
- [10] Carbon, B A, G A Bartle, A M Murray. A method for visual estimation of leaf area[J]. Forest Science, 1979, 25(1): 53 - 58
- [11] 张仁华, 孙晓敏, 等. 叶面积指数的快速测定方法——植被定量遥感的地面标定技术[J]. 国土资源遥感, 1998, (1): 54- 60
- [12] Aase, J K. Relationship between leaf area and dry matter in winter wheat[J]. Agronomy Journal, 1978, 70: 563- 565
- [13] Shih, S F, G S Rahi, G H Snyder, et al. Rice yield, biomass, and leaf area related to evapotranspiration[J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(5): 1458- 1464
- [14] Shih, S F, G J Gascho. Relationships among stalk length, leaf area, and dry biomass of sugarcane[J]. Agronomy Journal, 1980, 72: 309- 313

- [15] Ross, J J, W R Detar, R L Cunningham. Estimating the C factor in the universal soil loss equation for landscaped slopes: a field rating system [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1980, 35: 42- 44
- [16] 李勇, 武淑霞, 等. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 1- 7.
- [17] 李勇, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 科学通报, 1991, 36: 935- 938
- [18] 史立新, 等. 长江防护林(四川段)初期水土保持效益研究[J]. 水土保持通报, 1997, 17(6): 14- 22
- [19] 卫正新, 等. 不同林地林冠截留降雨特征的研究[J]. 中国水土保持, 1997(5): 19- 21.
- [20] 杨新民. 林草地水土保持效益分析[J]. 陕西水土保持, 1988(5): 372- 373
- [21] 仪垂祥, 等. 植被截留降水量公式的建立[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 47- 49
- [22] 陈廉杰. 乌江中下游低效林水土保持效益分析[J]. 水土保持通报, 1991, 11(6): 17- 22
- [23] 丸山岩三. 森林的水土保持机能[J]. 水土保持科技情报, 1994(2): 47- 50
- [24] Teklehaimanot, Z, P G Jarvis, D C Ledger. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing[J]. Journal of Hydrology, 1991, 123: 261- 278
- [25] Stanley r. Herwitz. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stem flow and throughfall generation[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1987, 12: 425- 432
- [26] Fahey, B D. Throughfall and interception of rainfall in a stand of radiata pine[J]. Journal of hydrology (N. Z.), 1964, 3: 17- 26
- [27] Rutter, A J, K A Kershaw, et al. A predictive model of rainfall interception in forests, I Derivation of, the model from observation in plantation of corsican pine[J]. Agricultural Meteorology, 1971, 9: 367- 384
- [28] Aston, A R. Rainfall interception by eight small trees[J]. Journal of Hydrology, 1979, 42: 383- 396
- [29] Mosley, M P. The effect of a New Zealand Beech forest canopy on the kinetic energy of water drops and on surface erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1982, 7: 103- 107.
- [30] Morgan, R P C. Splash detachment under plant covers: results and implications of a field study[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(4): 987- 991.
- [31] Finney, H J. The effect of crop covers on rainfall characteristics and splash detachment[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1984, 29: 337- 343
- [32] Morgan, R P C. Effect of corn and soybean canopy on soil detachment by rainfall[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(4): 1135- 1140
- [33] M J 克汉. 秸秆和作物覆盖对土壤流失的影响[J]. 水土保持科技情报, 1992(2): 50- 51
- [34] 周跃, David Watts. 高山峡谷区云南松林土壤侵蚀控制的水文效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 31- 38
- [35] 蔡强国, 黎四龙. 植物篱笆减少侵蚀的原因分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 54- 60
- [36] 余新晓, 毕毕兴, 等. 黄土地区森林植被水土保持作用研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 433- 440
- [37] 孙阁. 林地地表径流的研究[J]. 中国水土保持, 1989(2): 52- 56
- [38] 侯喜禄, 杜呈祥. 不同植被类型小区的径流泥沙观测分析[J]. 水土保持通报, 1985, 5(6): 35- 37.
- [39] C A Robinson. 植物过滤带对农地径流泥沙的影响[J]. 水土保持科技情报, 1997(4): 4- 5
- [40] Ghulam M H. 树冠下的土壤侵蚀[J]. 水土保持科技情报, 1989(3): 6- 11.
- [41] 李勇, 徐晓琴, 等. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J]. 科学通报, 1992, (4): 366- 369
- [42] 刘元保, 等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流失规律与水土保持措施优化配置研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 14- 17.
- [43] 蒋定生, 江忠善, 侯喜禄, 等. 黄土高原丘陵区水土流失规律与水土保持措施优化配置研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 14- 17.
- [44] 蔡庆, 唐克丽. 植被对土壤侵蚀影响的动态分析[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 47- 51.
- [45] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1- 9.
- [46] 郭忠升. 水土保持林有效覆盖率及其确定方法的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 67- 72
- [47] 卞义宁, 吕晓霞. 陇东黄土高原沟壑区水保林有效覆盖率及其确定方法[J]. 中国水土保持, 1998(3): 9- 10
- [48] 侯喜禄, 等. 黄土丘陵区森林保持水土效益及其机理的研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 98- 103