

高速公路道路建设中土壤侵蚀问题研究^{*}

余海龙^{1,2,3}, 阿力坦巴根那⁴, 顾 卫^{2,3}, 卜崇峰⁵

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021; 2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学 资源学院, 北京 100875; 4. 内蒙古通辽市 交通工程局二处, 内蒙古 通辽 028000; 5. 中国科学院 水利部 水土保持研究所工程中心, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:系统地分析了高速公路工程施工期土壤侵蚀发生原因、机制以及引起土壤侵蚀外来动力因素等, 并以此对土壤侵蚀进行分类, 总结了道路建设中水土流失的特点和危害。指出了其与传统土壤侵蚀的区别, 最后建议工程建设过程中的一些水土保持应依据自身特点确定防治范围。

关键词:高速公路; 建设工程; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)04-0015-04

Study on Some Problems of Soil Erosion During Expressway Construction Engineering

YU Hai long^{1,2,3}, Alitanbagenna⁴, GU wei^{2,3}, BU Chong-feng⁵

(1. College of Resources and Environment Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. 2nd Department of Bureau of Traffic Tongliao City Inner Mongolia, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 5. Engineering Center, Institute of Soil Erosion and Water Conservation Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In this paper, soil erosion during the expressway construction engineering is analyzed in a systematic way including the occurrence reason, mechanism of soil erosion and the external dynamic factors for soil erosion. Based on the above results, the classification of soil erosion was given, and the characteristics and fatalness of soil erosion occurred in the expressway construction engineering were concluded. The authors summed up the distinguishment between the soil erosion during the expressway construction engineering and the traditional soil erosion. At last, some advices on project of soil and water conservation were put forward and the main viewpoint is that the prevention range should based on the characteristics of soil erosion during the expressway construction engineering.

Key words: expressway; construction engineering; soil erosion

近年来, 中国公路建设不断发展, 尤其是高速公路的建设更是突飞猛进。由于高速公路的走向不仅要兼顾社会、经济、政治、军事和生态环境等方面的需要, 而且它又要满足车辆安全高速行驶的要求, 这就不可避免地会出现一些高填深挖路段, 再加上大规模的开山采石、取土以及大量弃土、弃渣都会对沿线周围环境造成严重破坏^[1], 进而加剧了人为水土流失灾害的发生和发展, 这不仅影响高速公路的运行安全和美观, 而且涉及到公路周边地区生态环境的恢复与区域经济的建设^[2]。因此, 高速公路建设区的水土保持就成了公路建设中出现的一个全新的课题。

1 我国道路建设水土流失现状

公路建设带来的诸多生态问题中, 水土流失是一个突出的环境问题, 是公路建设破坏水土资源、改变生态环境的集中表现形式。它是公路建设期或营运期因扰动地表或岩石层、堆置弃渣等造成的水土资源破坏及损失, 是一种典型的人为加速侵蚀^[3-4]。据统计, “十五”期间我国全部 76 810 个开发建设项目, 占地总面积 552.8 万 hm^2 , 其中共有公路建设项目 13 229 个(占总数的 17.2%), 占地总面积 119.6 万 hm^2 (占总面积的 21.6%)。各类开发建设项目弃土弃渣总

^{*} 收稿日期: 2007-05-29

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目“公路路域生态工程技术研究”(200331822333)资助

作者简介: 余海龙(1979-), 男, 甘肃酒泉人, 博士, 讲师, 研究方向为路域生态恢复与重建技术研究。E-mail: yhl@nxu.edu.cn

通信作者: 卜崇峰(1977-), 男, 陕西榆林人, 博士, 助研, 研究方向为水土保持。E-mail: buchongfeng@163.com

量 92.1 亿 t, 其中公路项目最多, 达到 42.4 亿 t, 占弃土弃渣总量的 46.1%, 公路建设项目造成的水土流失量为 1.43 亿 t, 占水土流失总量的 15.1%, 在所有项目中排列第 3 位。经预测,“十一·五”期间随着经济的快速发展, 各类开发建设项目的数量将会大幅增长、布局也将发生重大变化。其中, 公路开发建设规模将从“十五”的 192 万 km² 增长到 230 万 km², 增幅 19.8%。据此估算,“十一·五”期间全国开发建设项目扰动地表总面积为 616.4 万 hm², 水土流失总量为 10.09 亿 t, 弃土弃渣总量为 100.27 亿 t。与“十五”相比, 分别增加 11.5%、6.7% 和 8.8%。“十一·五”期间, 全国开发建设项目平均每年可能产生水土流失总面积 305.32 万 hm², 较“十五”期间实际发生水土流失面积增加 11.5%。其中, 公路开发建设造成的水土流失面积将达到 287.8 万 hm² (占 18.9%, 排第 3), 水土流失量 1.54 亿 t (占 15.3%, 排第 3), 弃土弃渣量 45.75 亿 t (占 45.6%, 排第 1)。

2 道路水土流失的原因及其发生机制

公路建设是一种特殊的人为活动方式, 强烈的改变了地表的自然状况, 使得地貌形态发生了根本性的变化, 因而其土壤侵蚀规律不同于自然地面^[5]。大量边坡的开挖和填方形成了面积巨大的裸露边坡。同时, 对区域环境内的原有动植物群落破坏非常严重, 极易发生水土流失和生物多样性减少。据研究, 裸露的公路边坡风速比林地大 15 倍, 比草地大 8 倍^[6]。风速大, 往往风蚀严重, 极不利于水分保持。另外, 由于坡度大, 土壤渗透性差等原因, 边坡土壤对降水截流较小, 这样一方面容易造成水土流失, 另一方面由于水土流失导致坡面土壤贫瘠, 立地条件差, 不利于植物生长; 在高速公路的阳坡或半阳坡面侵蚀更为严重, 原因是阳坡接受的热能辐射量较大, 土壤昼夜温差变化大, 干湿交替较剧烈而频繁, 物理风化强烈, 水分蒸发快, 湿度低, 不利于林草生长; 植被覆盖度低, 土壤中植物根系和有机质含量少, 团粒结构差, 土壤干燥疏松, 抗冲蚀性能差, 抵抗雨滴溅蚀能力弱, 故极易造成土壤侵蚀。其次, 阳坡为迎风坡, 降雨几乎垂直作用于坡面, 击溅力最大。同时, 风又加速了雨滴的重力加速度, 加速了土壤的侵蚀^[7]。总结其主要原因如下:

(1) 直接破坏地表植被造成的水土流失。在高速公路建设过程中, 因不同路段的高填、深挖、采石、取土、挖沙等直接破坏地表植被, 原有表土与植被之间的平衡关系失调, 使沙、土、石暴露于地表, 在雨滴击溅、地表径流的冲刷及风蚀作用下, 极易产生新的水土流失。

(2) 弃土、弃渣产生的水土流失。在隧道和挖方段施工过程中, 路段内挖方量大于填方量, 多余的土石方因受地形和运输条件限制不便运往填方段, 出现大量的弃土、弃渣, 对这些弃土(渣)场虽然采取了一些工程、生物防护措施, 但一时还难以完全奏效, 会产生新的水土流失。

(3) 破坏山体发生的重力侵蚀。施工过程中, 沿线进行大量的开挖, 在局部公路两侧遗留裸露的开挖面, 开挖面植被覆盖率极低, 并残存有一定数量不稳定的破碎体和泥沙, 在重力和降雨下发生侵蚀。在山区, 大量的采石、取土及路

基的深挖都会破坏山体坡面的原始稳定状态, 对山体的稳定性产生一定影响, 在暴雨和重力作用下, 容易诱发滑坡、坍塌和泥石流等重力侵蚀的发生。

3 道路侵蚀基本类型

道路侵蚀基本类型及其特征, 可首先按侵蚀对象分为道路建筑物的侵蚀及道路弃渣侵蚀^[8]。按照土壤侵蚀的基本理论, 土壤侵蚀的基本分类原则是形成侵蚀的动力。土壤受外应力作用时, 若外营力大于土壤颗粒间的结合力, 其结构即发生破碎, 如果外应力继续增加, 超过颗粒之间的摩擦阻力和重量时, 土壤就会发生移动, 也就是发生了土壤侵蚀。道路建设过程中, 造成土壤侵蚀的主动力因素主要包括水力、风力、重力作用、冻融作用以及人为作用等^[9]。

3.1 道路水力侵蚀

大气降水(尤其是降雨)是导致土壤侵蚀发生的最主要的动力因素之一。降雨根据阶段可以产生 3 种引起土壤侵蚀的外营力: 雨滴的击溅作用、径流对坡面的冲力和径流汇流对坡角的冲刷作用。首先, 雨滴以一定的速度下落, 可以对路域内任何裸露地面产生溅蚀作用; 雨强较大时, 边坡上产生径流, 径流的冲刷作用会导致坡面上的土壤侵蚀(主要是面蚀); 当边坡较高时, 挟泥沙而下的径流到达坡底时, 已经拥有了一定的速度, 这样的泥沙流会对坡角处的土壤产生冲刷作用, 造成该处土壤侵蚀。有时坡顶的汇流沿坡面流下, 伴随重力侵蚀作用, 会对松散坡面(如路堤边坡面)形成大的冲沟侵蚀。暴雨洪流造成的道路毁损通常被视为洪水灾害范畴, 但从科学意义上讲亦应属于道路水力侵蚀。

3.2 风力作用

风的作用使地表土壤颗粒脱离地表被搬运的现象以及挟沙气流中的沙粒对土壤表面的磨蚀作用就是风力侵蚀。道路建筑物表面一般都是经过防护或硬化的, 因此这些地区气候干旱, 风力强劲, 很易对路域内裸露地表造成吹蚀, 强大气流挟带的沙砾, 甚至对用砂砾或松软岩层填筑的路基, 都会产生不同程度的风蚀。

3.3 重力作用

重力侵蚀是一种以重力作用为主引起的土壤侵蚀形式, 包括土体在重力作用下导致崩塌、错落、滑脱及蠕动现象。但是重力侵蚀的发生还必须有其他一些辅助的条件, 如土壤中水分的下渗、土壤的物理性质、岩石的结构以及地形条件等。在铁路工程建设过程中, 重力作用导致的土壤侵蚀一般是伴随其他外营力(包括径流的冲刷力和冻融作用等)造成的复合型土壤侵蚀。如新建秦沈客运专线绥中段, 暴雨后路堤顶部的汇流沿坡面流下时产生的冲沟, 就是坡面径流冲刷力与重力综合作用的结果^[10]。

3.4 冻融作用

冻融侵蚀是因温度的变化而导致的土壤侵蚀现象。它的作用机理是冻融使边坡上的土体含水量和容重增大, 因而加重了土体的不稳定性; 冻融使土体发生机械变化, 破坏了土壤内部的凝聚力, 降低了土壤的抗剪强度; 土壤冻融的时空不一致性, 使得融化土层和未融化土层之间产生一个不透水层, 水分在交

界面上流动,也会引起土体的机械破坏等。我国的冻融侵蚀区主要分布在我国西部的青藏高原、新疆天山等一些高山地区 and 黑龙江流域、大小兴安岭等高寒地区^[10]。冻融作用伴随重力作用可能会造成路基地面的下陷和坡面土体的下滑,这不仅会导致发生土壤侵蚀,更重要的是会造成工程的破坏。因此,解决好冻融作用带来的影响对冻土区的道路工程至关重要^[11]。

3.5 人为作用

道路工程建设中的一切人为活动不仅是土壤侵蚀直接的原动力,而且还是其他动力因素造成土壤侵蚀的辅助因素,可以说正是人为活动才是道路工程建设造成当地土壤加速侵蚀的真正原因。

4 道路建设水土流失的危害

道路建设造成新的水土流失是由于人为扰动地面、堆积

固体废弃物和构筑各类人工边坡造成的水资源和土地资源的破坏和损失,是一种典型的现代人为加速侵蚀。土地资源的破坏不仅是表层土壤,往往破坏至深层土壤甚至基岩,深者可达到几十米乃至数百米。水土流失形式往往表现为岩石、土壤(包括风化壳或者松散岩土)、固体废弃物的混合搬运,其结果导致水土资源的破坏和损失,最终是土地生产力的下降乃至完全消失。

公路工程正常运营期间对沿线的生态系统及其物种多样性的影响都很小,而施工期间的一次性干扰和破坏却是比较大的,公路工程施工建设施工期对沿线生态系统的影响主要包括路基工程(路基线路及开挖填埋)砂石料场设置,工程取土和弃土,临时施工便道,施工临时场地(含生活营地、桥涵隧道工程、工程永久站场和工程施工人员活动对生态环境造成的影响^[11]。

表 1 工程施工对沿线生态环境的影响

工程项目	影响方式
路基	通过路基、站场压占,地表植被和植物物种受到彻底破坏,植被盖度和植物物种多样性下降为零,工程对沿线生态系统和景观类型的线性切割,造成生境的破碎化
边坡	通过开挖取土或填土,地表植被和土壤结构受到彻底破坏,植物群落盖度和植物物种多样性下降,工程结束后地表植被和物种多样性开始缓慢的自然恢复过程
取弃土场	通过开挖取土或弃土,地表植被和土壤结构受到彻底破坏,植物群落盖度和植物物种多样性下降,工程结束后地表植被和物种多样性开始缓慢的自然恢复过程
施工便道	通过运输机械(车辆)碾压,破坏地表植被和土壤物理结构,植被盖度和物种多样性下降,工程活动结束后地表植被和物种多样性开始缓慢的自然恢复过程,其恢复速度取决于原始土壤和植被受破坏的程度
桥涵工程	地表土壤结构和植被受破坏的程度较小,工程活动结束后地表植被和物种多样性的自然恢复过程较快
隧道工程	地表土壤结构和植被受破坏的程度较小,仅在隧道进、出口处土壤结构和植被受到破坏。
施工营地	由于场地占用、机械碾压以及人员活动等,地表植被和土壤结构受到一定程度的破坏,工程活动结束后地表植被和物种多样性自然恢复过程较快

造成新的水土流失,涉及到从施工期到建成运营期整个阶段,但主要产生于施工过程中^[12]。据水利部统计^[13],全国每年修路、开矿等新增水土流失面积达 1 000 km²,四川省每年因修路造成土壤流失量高达 2 678 万 t^[14],公路建设引起的水土流失数量之大让人触目惊心。道路建设水土流失的危害主要表现为:

- (1) 导致结构失稳,增加养护成本,降低公路行驶安全。公路长时间受到侵蚀后,路堑边坡容易出现岩土体剥落、坍塌,淤积边沟,妨碍排水;路堤边坡也易造成局部冲沟,甚至路面边缘底部也出现悬空的现象,其结果不但会给日后的养护带来一定的麻烦,而且对公路的行使安全也造成威胁。
- (2) 损害农水设施,破坏水土资源。公路建设路线长,穿越区内农田水利水保设施多,在建设过程中如不注意水土保持,农水措施必然会受到不同程度的损害,使土地资源减少。土地生产力下降。
- (3) 恶化生态环境,加剧洪涝灾害。以往公路建设不但扰动地表,破坏植被,丧失地面原有水土保持功能,而且废土废渣乱倾乱倒,侵占农田,污染了周围环境;淤塞河道,妨碍行洪,减少库容,增加洪水泛滥的可能性。
- (4) 影响投资环境,制约可持续发展。公路建设破坏大量地貌植被,乱倾乱倒大量废土废渣,已经造成或者潜在造

成严重的水土流失,生态环境、自然环境均遭到破坏,旅游资源的开发、动植物的生存条件受到影响,直接抑制了地方经济的可持续发展。

5 道路水土流失的特点

道路建设中大型的地表扰动以及建成后微地形的改变,都会使路域范围内的土壤特征产生很大的变化,而这也必然会对土壤的抗蚀性造成很大的影响,从而最终影响着路域水土流失的发生频率和强度。道路建设造成的新的水土流失的形式、原因及其发生发展规律,首先是服从于公路建设区所在的水土流失类型区的大规律,并在各种自然、人为因素的影响和作用下,形成自身特殊的规律。道路建设所产生的新的水土流失时在强烈的人为作用下产生的,自然因素的影响是潜在的并具有一定的区域性,而人为因素的影响是主导性的。这是因为公路建设活动对可变动的中小地形地貌产生剧烈的人为扰动。其破坏水土资源、破坏植被,对自然因素的作用和影响之大是空前的,归纳起来包括两个方面:一方面是人类作用对自然因素的影响,而受影响后的自然因素反过来影响水土流失;另一方面是人在施工建设活动中,对水土流失的控制作用。

简单地说,公路建设造成的新的水土流失是在人为作用

下诱发产生的,它与原地貌条件下的水土流失有着天然的联系,但也有自身明显的特点。土壤侵蚀是土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程^[15]。这一定义是我国土壤侵蚀研究领域绝大多数学者所认同的定义。根据这一定义,公路工程施工期的土壤侵蚀可以认为是:由于工程建设的影响,施工用地范围内的土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力以及一些人为活动作用下,被破坏、迁移和沉积的过程;包括两部分:一是工程占地范围内不受公路工程建设影响的原有土壤侵蚀,另一部分是人为活动造成工程占地范围内产生的新的土壤侵蚀。

5.1 公路工程建设中的土壤侵蚀具有以下特点

(1) 人为活动造成。公路产生的水土流失不是由自然灾害引起的,而是由人类在公路建设过程中大量砍伐地表植被、大面积的开挖土石方使公路沿线生态环境遭到破坏而带来的后果。

(2) 侵蚀区呈线形,危害集中在公路沿线。公路工程施工过程中,对周围土壤环境的横向影响范围有限,与公路的纵向长度相比较可以忽略,在讨论公路工程建设中的土壤侵蚀区时,就可以近似把它看成一个线形的区域来处理。公路工程的水土流失主要是公路路基开挖裸露面、取土场、采石场、弃渣场等区域,场地都位于公路沿线,因此它们所造成的水土流失危害也在公路沿线。

(3) 涉及的侵蚀类型复杂。公路线路一般较长,同一个工程常同时跨越几个不同的侵蚀类型区,这样在对公路工程建设土壤侵蚀影响进行预测时,就必须将不同的侵蚀类型分别对待、区别预测、分别设计防治措施。侵蚀带跨越的土壤侵蚀类型区数量随主体工程的长度而变化,土壤侵蚀以水力、重力侵蚀为主。

(4) 土壤侵蚀量大。公路工程建设会有很大的挖方和填方,这是一种很大的人为土壤侵蚀。工程中产生大量的弃土和弃渣,如果对弃渣和弃土不能很好地进行安置和防护时,则会导致更严重的水土流失。

(5) 治理标准要求高。公路是人类活动比较频繁的区域,每时每刻都有车辆通过,一旦公路附近发生泥石流、塌方等灾害,必然会造成严重的交通事故。此外,公路也是路域生态环境概况的一面镜子,公路沿线的绿化情况能反映当地的生态环境质量,为此公路的水保防治措施相对于其他行业,标准较高。

5.2 道路建设造成侵蚀的形式及特点

道路建设造成新的水土流失是由于人为扰动地面、堆置固体废弃物和构筑各类人工边坡造成的水土资源的破坏和损失,是典型的现代人为加速侵蚀。土地资源的破坏不仅仅是表层土壤,往往破坏至深层土壤甚至基岩,深者可以达几十米乃至数百米,水土流失形式往往表现为岩石、土壤(包括风化壳或松散岩土)、固体废弃物的混合搬运,其结果导致水土资源的破坏和损失,最终是土地生产力的下降乃至完全消失。简单地说,公路建设造成的新的水土流失是在人为作用下诱发产生的,较原地貌条件下的水土流失有着天然的联系,但也存在明显的区别,主要表现在:

(1) 诱发性水土流失形式,是公路建设造成的新的水土流失的主要形式,其发生频率大。在山区、风沙区、丘陵区的公路建设一般分布在沟岸、河岸或山坡体上,开挖、爆破、剥离、堆弃搬运极易导致山坡岸坡失衡,引发严重的重力侵蚀,特别是诱发性滑坡、崩塌和泥石流等在全类工程建设中屡见不鲜,侵蚀强度可达自然侵蚀的几倍至几十倍,发生频数惊人,这使山区、丘陵区和风沙区的生态环境进一步恶化,景观格局发生明显变化。

(2) 岩土扰动程度大,地面植被和土壤破坏严重,甚至损失殆尽。由于地面失去保护,水土流失非常剧烈;植被、土壤、岩层的破坏,导致地表水渗漏、地下深层储水结构破坏;地面水文平衡和整个水分循环系统改变;水质污染加剧,在风沙区可能导致土地荒漠化。

(3) 废弃场和废弃物组成成分复杂,包括岩石、土壤、土状物、尾渣、粉煤灰、炉渣、垃圾等,土壤侵蚀的剥离搬运物质不仅是土壤或一般意义上的土体,而且是岩土废弃物的混合搬运,故固体废弃物堆积和废弃场的水土流失不是土壤侵蚀,而是岩土侵蚀。

(4) 公路建设区存在这明显不同于自然地貌条件下的水土流失形式的特殊形式——特殊工程侵蚀类型。包括固体废弃物堆积体的非均匀沉降等引起的各种侵蚀类型。公路建设区特殊水土流失形式不仅存在于山区、丘陵区和风沙区,甚至在轻微侵蚀的平原、盆地区也会导致严重的水资源和土地资源的破坏。

(5) 工程建设区固体废弃物多倾泻河道或堆置在流域内。废弃物淋溶水及地表径流水的流失和渗漏,造成了地表水和地下水的污染,成为水资源破坏的一种特殊形式。

公路建设项目水土流失是在区域自然地理因素即水土流失类型区的支配和制约下,由于各种自然因素包括气候、地质、地形地貌、土壤、植被等潜在影响,通过人为建设活动的诱发、引发、触发作用而产生的一种特殊的水土流失类型,它既有水土流失的共性,也具有自身的特性,因为公路建设是线性项目,对地面的扰动特点表现为多种多样,因此施工过程中对水资源和土地资源的破坏是多方面的。公路施工过程中要开挖山体、削坡、修隧道、架桥,高处要削低、低处要填高,因此对土地资源的破坏不仅仅是表层土壤,往往破坏至深层土壤,水土流失形式表现为岩石、土壤、固体废弃物的混合搬运。从这一点看,公路建设水土流失和其他一般性的人为水土流失是有区别的,应根据其自身的特点确定水土流失防治范围。

参考文献:

- [1] 王代军,胡贵馨,高洁.公路边坡侵蚀及坡面生态工程的应用现状[J].草原和草坪,2000(3):22-25.
- [2] 杨喜田,董惠英.黄土地区高速公路边坡稳定性的研究[J].水土保持学报,2000,14(1):77-81.
- [3] 马少杰,刘国东,李光伟.高速公路建设水土流失防治研究[J].东北水利水电,2007,25(1):64-70.

(下转第 23 页)

22% 的天然降雨转化为土壤水分。

(2) 雨季土壤水分以垂直渗透为主, 改造后微地形土壤水分运移动速度明显增大, 最大运移速度大约为 15~ 17 cm/d, 但随着坡度增加, 土壤水分的侧向损失有所增加, 雨后, 土壤水分以零通量面为界, 在零通量面以上水分向上运动, 零通量面以下向下运动。

(3) 在集中降雨条件下, 水平台、水平沟整地后能使拦截的降雨在 0~ 200 cm 土层范围进行分配, 且缓坡上的水平台能使 100 cm 以下的土壤水分得到明显改善, 而自然坡面入渗的水分主要在 0~ 100 cm 范围分配, 且改善土壤水分效果不好, 100 cm 以下土层, 降雨后土壤水分仍维持在较低水平。

4.2 讨 论

通过试验得出, 集中降雨后, 0~ 100 cm 土层范围内土壤水分平均通量从大到小依次是水平沟、水平台和自然坡面, 而 100~ 200 cm 土层范围内从大到小依次是水平沟、水平沟和自然坡面, 这可能是由于水平沟坡度较陡, 侧渗损失较大造成的, 同一坡度上的水平台和水平沟水势分布比较有待于进一步研究。从水分运动的通量看, 湘北红壤坡地雨水自然资源化程度为降水量的 $(46 \pm 2)\%$ ^[10], 这比干热河谷自然坡面的转化率高出 1 倍多, 这可能与干热河谷土壤水分长期亏缺, 土壤比较紧实有关。对土壤水分运移速度, 王克勤研究集中降雨期植树带土壤水分垂直分布规律时指出: 8 m² 拍光的最高土壤水分出现的层次大约以 0.2~ 0.25 m/d 的速度下移相比明显偏小, 这可能是由于集水面积差异和没有植物根系等原因造成的^[11]。张志强指出: 植被根系的存在很大程度影响到土壤水分运移^[12], 由于本试验区没有植被覆盖, 水分运移没有考虑汇源项的影响, 因此, 对微地形植被根系影响下的土壤水分运移状况有待进一步研究。

参考文献:

[1] 雷志栋, 杨诗秀, 等. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大

学出版社, 1988: 125-126.

[2] 张建丰, 王文焰. 利用野外一维垂向入渗实验确定土壤水分运动参数[J]. 水土保持学报, 1994, 8(1): 69-77.

[3] 苏培玺. 沙质土壤水分运动参数研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 329-332.

[4] 付美芬, 高洁. 元谋干热河谷影响植被恢复和造林成活率的主要气候因子研究[J]. 西南林学院学报, 1997, 17(2): 36-42.

[5] 宋孝玉, 康绍忠, 等. 陕西长武王东沟径流小区土壤水分运动参数测定[J]. 西北农林科技大学学报, 2003, 31(4): 179-181.

[6] Taha A, Gresillon J M. Modelling the link between hillslope water movement and stream flow: application to a small Mediterranean forest watershed[J]. Journal of Hydrology, 1997, 203: 11-20.

[7] 程云, 陈宗伟, 等. 重庆缙云山不同植被类型林地土壤水分特征曲线模拟[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 80-83.

[8] F Chamran et al. Spatially explicit treatment of soil water dynamics along a semiarid catena[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(5): 1571-1583.

[9] 陈孝民, 潘根兴. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率的研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(5): 11-14.

[10] 谢小立, 王凯荣. 湘北红壤坡地土壤水分特征及水分运移[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 104-107.

[11] 王克勤. 集水造林与水分生态[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.

[12] 张志强. 森林水文: 过程与机制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 110-117.

(上接第 18 页)

[4] 牛兰兰, 丁国栋, 赵方莹. 公路建设项目水土流失及其防治措施初探[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 114-118.

[5] 张绒君, 王晓, 等. 线性开发建设项目的土壤侵蚀与工程防治[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 139-141.

[6] 刘秀峰, 贵遵高, 等. 级公路边坡人工植被状况调查研究[J]. 草业科学, 2001(4): 65-72.

[7] 胥晓刚, 杨冬生, 胡庭兴. 公路区域生态破坏及植被恢复技术应用与研究进展[J]. 中国园林, 2005(1): 51-54.

[8] 李文银, 王治国, 等. 工矿区水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[9] 俞文煜, 等. 公路建设中的水土保持对策研究[J]. 华东公路, 2000(5): 50-51.

[10] 程昊. 冻土地区青藏铁路建设水土流失分析及控制措施[J]. 中国水土保持科学, 2004(5): 19-21.

[11] 王根绪, 吴青柏, 王一博, 等. 青藏铁路工程对高寒草地生态系统的影响[J]. 科技导报, 2005(1): 8-13.

[12] 沈渭寿, 张慧, 邹长新, 等. 青藏铁路建设对沿线高寒生态系统的影响及恢复预测方法研究[J]. 科学通报, 2004, 49(9): 909-914.

[13] 张志强. 陇中黄土高原丘陵区生态建设与可持续发展[J]. 科技导报, 2000(1): 43-45.

[14] 焦居仁. 从 1998 年洪水看加快水土流失治理的紧迫性[J]. 水土保持科技情报, 1999(1): 6-7.

[15] 王礼先, 等. 水土保持学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.