

植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献

徐则民¹, 黄润秋², 唐正光¹, 王苏达¹

(1. 昆明理工大学 土木系, 云南 昆明 650224; 2. 成都理工大学 工程地质研究所, 四川 成都 610059)

摘要: 根系对土体的加固效应是显著的, 植被能够遏制面状水土流失及浅层滑坡。但是, 由于大多数植物的根系都分布在地表以下 1.5 m 的深度以内, 其加固深度远小于深层滑坡的滑面埋深; 另外, 蒸腾能够显著降低地下水位, 但由于其主要发生在降雨事件的间歇期或旱季, 而且进展缓慢, 不能有效控制降雨过程中地下水位的大幅抬升及应力环境的恶化, 因此, 植被在深层滑坡防治方面的作用是有限的。与植被相关的干裂缝、动物通道、膨胀裂缝及结构性孔隙等在岩土体中形成的相对稳定的大空隙系统可以显著优化地下水的补给环境, 使得斜坡能够吸收除植被拦截之外的几乎所有降雨量; 植被发育斜坡的“渗入—径流—蒸腾”复合型水循环将引起地下水径流模数持续增大及岩体综合质量的渐进性衰退, 为斜坡整体滑移奠定基础。植物根系呼吸及枯枝落叶降解等生物地球化学过程会向土体中释放 CO₂ 及有机酸等酸性物质, 提高土体酸度及渗入水的侵蚀性。同时, 植被发育斜坡中地下水的新老交替可以使水岩交换相饱和指数始终处于较低水平, 保证水岩化学作用的持续进行。因此, 植被对深层滑坡孕育的贡献是显著的。

关键词: 边坡工程; 植被; 浅层滑坡; 水循环; 水岩化学作用; 深层滑坡

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)03-0438-13

LIMITATIONS OF BIOTECHNICAL SLOPE PROTECTION AND CONTRIBUTION OF VEGETATION TO DEEP SEATED LANDSLIDE PREPARATION

XU Ze-min¹, HUANG Run-qiu², TANG Zheng-guang¹, WANG Su-da¹

(1. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China;

2. Engineering Geology Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu 61005, China)

Abstract: The mechanical reinforcement provided by roots is remarkable. However, because the root zones of most plants distribute generally within 1.5 m underground, failure planes of deep seated landslides typically pass well below the rooting zone. As an important discharge way, the transpiration can lower groundwater table of slope aquifer. Because transpiration takes place mainly in intermittent periods of rain events or in dry season, it can not substantially reduce peak groundwater levels in precipitation. Vegetation cover has minimal effect in deep landslide mitigation. Dry crack, animal passage way, expanding fractures, and structural pores related to vegetation cover, constitute a relatively stable macropore system in upper slope mass, which improve markedly the recharge environment of groundwater and make slopes absorb all precipitation except interception by vegetation. The compound circulation model of 'Infiltration-groundwater runoff-transpiration' in vegetated slopes lead to the continued increase of groundwater runoff rate and the gradually dropoff of rock-mass composite quality. Biogeochemical processes, such as root breathing and litter degrading, release acidic substances like CO₂ and

收稿日期: 2003-06-25; **修回日期:** 2003-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40272119); 云南省自然科学基金资助项目(2001E0001G)

作者简介: 徐则民(1963-), 男, 1998 年于西南交通大学获得桥梁与隧道工程专业博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事工程地质及岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: zeminxu@vip.km169.net。

organic acids and raise the acidity of soilmass and the erosiveness of the infiltrating rain. At the same time, the pre-event water giving place to the event water in vegetated slopes makes saturation index of water-rock exchange phases keep a low level and chemical water-rock interaction can continue. Therefore, the contribution of vegetation to the deep seated landslide preparation is notable.

Key words: slope engineering; vegetation cover; shallow landslide; groundwater circulation; chemical water-rock interaction; deep seated landslide

1 引言

植被根系本身的抗拉、抗剪强度一般都大于土体,在根系-土体摩阻力作用下,可以提高土体的抗剪强度,具有固土护坡的功效^[1~4]。此外,由于植被护坡还可起到保护生态环境、吸收大气 CO₂、促进碳循环^[5]等作用,将植树种草作为区域性斜坡灾害防治及水土流失控制的首选方案是合理的^[6]。

近年来,随着人们环保意识的增强,生态护坡在工程边坡,特别是高等级铁路、公路路基边坡的防护方面也得到了应用^[7~9]。由于斜坡地理位置、规模、地质特征及夷平-失稳方式等方面的差异,植被对斜坡稳定的影响是复杂的、多方面的,许多情况下都可能起到促进斜坡失稳的作用。文[10]指出,在一定条件下,植被的水文地质效应(增加降水渗入量)和力学效应(增重及传递风力的动荷载)会对斜坡稳定产生不利影响。本文以相关领域的研究成果为基础,讨论了植被护坡的局限性及其对斜坡长期演化和深层滑坡孕育的贡献。

2 根系加固效应及其局限性

在国际地科联滑坡工作组提出的滑坡整治方案体系中,种植植被与锚固等力学手段并列,被推荐为斜坡内部加强(internal slope reinforcement)的手段^[11]。植被发育斜坡的稳定性分析方面,除植被引起的土体粘聚力变化及单体根系的张应力外,文[12]所提出的分析模型还考虑了植被的自重、风力荷载及蒸腾引起的空隙水压力变化;文[13]在考虑粘聚力、内摩擦角变化的同时,将根系的锚固作用概化为一个综合的抗滑力纳入其分析模型。文[1, 2, 4, 13]等都曾进行过含根系土体强度特性的试验研究,所涉及的植被包括草、灌木及乔木等;所测试的指标主要是粘聚力、内摩擦角、抗切及抗拉拔强度等。表1为王秀茹(1989)在某林场测定的几种乔灌林地、农用地及裸地土体的粘聚力^[13]。尽管由

于在试验植被种类、植被年龄及土体性质等方面存在的差异,不同学者的试验结果有较大出入,但根系对土体强度的加强一般都是显著的。

表1 不同植被土体的粘聚力(王秀茹, 1989)

名称	植被深度/cm			
	0~30 cm	30~60 cm	60~80 cm	平均
刺槐+油松	0.65	0.75	0.55	0.65
刺槐	0.60	0.62	0.57	0.60
油松	0.42	0.71	0.63	0.58
虎榛子	0.48	0.50	0.49	0.49
沙棘	0.46	0.51	0.38	0.45
农地	0.40	0.51	0.32	0.41
荒草地	0.37	0.32	0.35	0.35

根系是植被与土体界面进行物质和能量交换的唯一桥梁,其形态和分布直接反映植被对立地利用的状况,对植被的生长具有决定性的作用^[14]。长期以来,人们对植物根系进行了大量的调查研究,在根系垂直分布方面积累了大量实测资料。

文[15]研究了7种我国东北地区常见的草坪草种的根系垂直分布状况(图1)。文[16]发现,象草和壮丽草两种根系发达的热带草种的根系主要分布在0~20 cm土层范围内,根量分别占总根量的68.1%和57.7%(表2)。

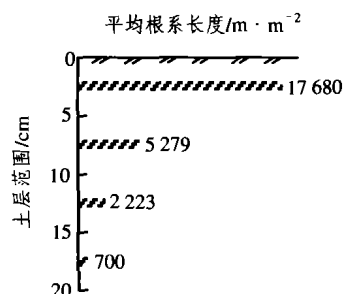


图1 7种草坪草平均根系长度(m/m²)的垂向分布^[15]

Fig.1 Perpendicular distribution of average root length (m/m²) of seven turf grasses^[15]

表 2 象草及壮丽草根量与根密度随土层深度的变化^[16]Table 2 The variations of root weight and root density of elephant grass and imperial grass with depths^[16]

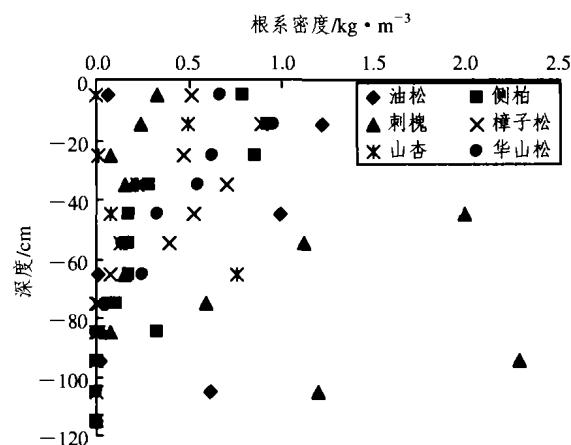
土层深度/cm	根量/kg·m ⁻²		根系密度/kg·m ⁻³	
	象草	壮丽草	象草	壮丽草
0~10	0.356	0.112	23.0	5.0
10~20	0.277	0.133	14.8	4.2
20~40	0.161	0.121	5.7	2.3
40~80	0.136	0.059	3.0	0.7

文[17]对 8 种水土保持灌木的研究表明,根系主要分布在 0~40 cm 土层范围内,主要吸收层在 0~20 cm。文[18]对 14~20 a 生的华北落叶松人工林的调查发现,林木主根主要分布在 0~20 cm 的土层内,直径大于 1 cm 的骨骼根集中分布在 0~40 cm 的土层中,40 cm 以下土层中骨骼根很少;直径小于 1 mm 的细根和毛根有 60%~90% 分布在 0~30 cm 的土层内。文[19]对甘肃民勤地区人工樟子松的研究表明,0~100 cm 土层范围内,从上到下根系迅速减小;0~20 cm 土层范围内根系分布最为集中,根重和根长分别占其总量的 58.6% 和 61.2%,其中小于 1 mm 的毛细根干重达一半以上,长度达 80% 以上;60~100 cm 土层范围内,根量明显减小,只占总量的 5% 左右,且只有小于 5 mm 的根系零星分布,较粗的根系已不存在。据文[20]报道,树龄在 32~55 a 的延边天然赤松的根系发达,主根长度一般在 60~80 cm,在土层比较深厚的地段,可达 1 m 以上,其根系主要分布在地面以下 60 cm 深度范围内。李勇(1990)对某林场树龄为 20~25 a 油松人工林的研究发现,直径大于 5 mm 的粗壮根系中有 50% 分布在 0~60 cm 土层中;1~5 mm 根系有 85% 分布于 0~100 cm 范围,其中以 0~30 cm 最为集中;小于 1 mm 根系在 0~30, 30~70 及 70~300 cm 土层中的分布分别为 78%, 16% 和 6%,而且该直径根系的根密度 R_d (条/(100 cm²))与深度 Z (m)的回归关系遵从指数分布^[13],即

$$R_d = 504.9165 \exp(-0.03305Z)$$

文[21]对 6 个造林树种的根系分布进行了系统研究(图 2),除具有深根性特征的刺槐根系分布离散度较大外,其他树种的根系几乎全部分布在地表以下 1.2 m 的深度范围内,而文[14]对同一地区刺槐(树龄为 15~24 a)根系的专门研究发现,阴坡与阳坡立地上的刺槐根系均表现出随着深度增加而减少的趋

势,大部分根系(总根量的 90% 以上)都集中于地表以下 0~100 cm 的土层中。

图 2 同一立地不同树种的根系垂直分布^[21]Fig. 2 Vertical root distribution of some tree species planted in the same site^[21]

据 T. S. Coile (1936) 的研究,尽管根系密度随着树龄的增大而增加,但在一定树龄后就可以达到水平分布和垂直分布的极值;H. Lyr 等(1967)的研究表明,林木生长早期,根系就已达到较大的分布深度,随着树龄的增加,其分布深度不再有明显的增大^[14]。文[21]的研究发现,油松在幼年期(11 a)就可达到根系分布的最大深度。

综合上述分析可以看出,植被根系的垂向分布受到植被种类、年龄及植地条件等多方面因素的影响,但根系密度随着深度的增加而急剧减少这一规律是普遍的;植被的粗壮根系及高密度区主要存在于地表以下 1.5 m,最大不过 5 m 的范围内。

根系对其存在的土体的力学加固效应是显著的,但这种效应仅存在于地表以下很浅的深度范围内;尽管某些深根性植物的根系可以到达地下 5 m,甚至 5 m 以下的深度,但在这一深度范围,无论单根直径,还是根系总密度都已大幅衰减,其加固效应已十分微弱。从根系的力学加固效应来看,植被对于遏制面状水土流失及部分浅层滑坡是有效的,但在分布更为普遍、危害性也更大、滑面埋深大于 4.5 m 的深层滑坡^[22~28]的防治方面,其功效是十分有限的,同时这一结论也可以从大量植被发育斜坡的深层失稳事件^[10, 12, 22, 23]中得到证实。

3 叶片蒸腾

蒸腾是指植被根系从土体中吸收水分后,由叶片的气孔散发到大气中的过程。排水是斜坡维护及

滑坡整治的重要措施之一, 种植植被是国际地科联滑坡工作组推荐的斜坡排水手段之一^[11], 其依据就是通过蒸腾来降低地下水位。

据文[29]报道, 在亚马逊流域热带雨林区 2 个典型盆地, 植被蒸腾量分别占到当地 2 000 mm 降水量的 62%和 48%; 在扎伊尔的岩盖姆比森林保护区, 蒸发散(evapotranspiration)水量占当地 1 500 mm 降雨量的 63%。文[30]对辽东山区 5 种主要森林植被的观测研究表明, 生长季蒸腾耗水量为 240~369 mm, 占同期降雨量的 32%~50%(图 3)。

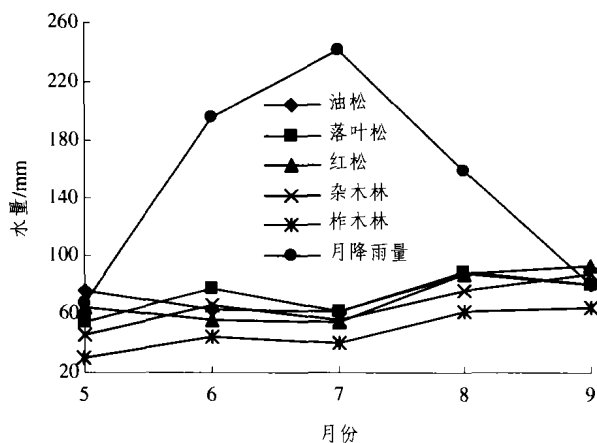


图 3 几种林木生长季蒸腾耗水量与降雨量^[30]

Fig.3 Water consumption of some tree species in growing season and precipitation^[30]

文[31]报道了鄂尔多斯与黄土高原过渡地区 3 种灌木在丰水年和枯水年生长期(5 个月)内的蒸腾情况(表 3)。文[32]的研究表明, 沙棘林蒸腾耗水量与降雨量具有比较显著的正相关关系(图 4); 生长季(5~9 月)的蒸腾耗水量为 257.6 mm, 占同期降雨量的 63%, 这一结果与余清珠(1991)和杨新民(1998)的研究结论基本一致。

表 3 3 种灌木蒸腾耗水量^[31]

Table 3 Water consumed from transpiration of three shrubs^[31]

年份	A/mm	沙棘		沙柳		柠条	
		B/mm	n/%	B/mm	n/%	B/mm	n/%
1998 年	433.9	96.17	22	45.46	11	71.40	16
1999 年	298.9	58.36	20	29.23	10	49.74	17

注: A 代表生长期降雨量(mm), B 为蒸腾消耗量(mm), $n = B/A$ 。

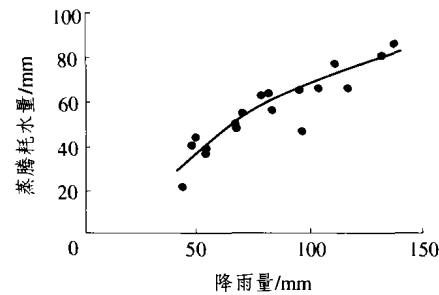


图 4 沙棘林蒸腾耗水量与降雨量的关系^[32]

Fig.4 Relation between water consumption through transpiration of plantation and precipitation^[32]

在斜坡地下水循环中所发挥的作用是显著的。但必须指出的是, 与斜坡的其他排水方式不同, 蒸腾主要发生在降雨间歇, 而且速率很低(表 4), 其排水效应需在较长的时间尺度上方能体现, 并不能遏制暴雨或连续降雨期间斜坡地下水位短时间内的大幅抬升, 因此并不能显著改善斜坡的稳定状况。

表 4 部分树种的蒸腾耗水速率(据文[33], 略有变动)

Table 4 Water consumption rate by transpiration in different tree species^[33](revised)

树种	树名	树龄 /a	mmol · /m ⁻² · s ⁻¹					
			晴天		阴天		阴雨天	
			白天	全天	白天	全天	白天	全天
针叶乔木	油松	5	0.122	0.066	0.081	0.043	0.057	0.032
	侧柏	5	0.111	0.058	0.107	0.056	0.093	0.051
阔叶乔木	毛白杨	1	1.512	0.861	1.243	0.715	0.926	0.560
	臭椿	1	0.692	0.401	0.568	0.399	0.477	0.299
	火炬树	1	0.561	0.304	0.404	0.221	0.288	0.171
	黄栌	1	0.733	0.399	0.661	0.347	0.516	0.305
灌木	枸杞	1	1.316	0.834	1.168	0.734	0.791	0.521
	沙棘	1	1.266	0.799	1.161	0.646	0.425	0.459
	柠条	1	1.337	0.770	1.003	0.489	0.758	0.442

4 植被与斜坡演化及深层滑坡孕育

大多数滑坡都是应力环境变迁引起的岩土体时效变形的结果。也就是说, 斜坡发生显著位移或整体滑移之前一般都要经历较长时间的演化, 也即滑坡孕育过程, 因此, 斜坡演化及滑坡孕育机理研究对于斜坡维护及滑坡预报是重要的^[34~36]。由于斜坡岩土体的流变是在近地表的复杂环境下进行的, 与深埋地下空间开挖诱发的岩土体时效响应问题^[37]存在明显区别; 在造成这种差别的环境因素体系中,

上述分析表明, 蒸腾作为地下水垂向排泄的重要途径, 其耗水量一般都在当地降雨量的 20%以上,

地下水应该是最主要的,而植被在很大程度上决定着地下水影响滑坡孕育的方式、程度及规模。

植被对深层滑坡孕育的影响是一个复杂的动态过程。直观上看,植被是通过促进降水入渗、叶片蒸腾、枯枝落叶及动植物生命活动影响地下水渗流场及岩土体化学环境等方式来实现的;在细节上,多数环节都是彼此交织、纠缠在一起的,各个环节构成了一种彼此驱动的动态演化架构(图 5)。尽管如此,依然可以从该体系中梳理出植被促进滑坡孕育的 3 条主线:地下水补给、斜坡水循环和水岩化学作用 CWRI(chemical water-rock/soil interaction)。

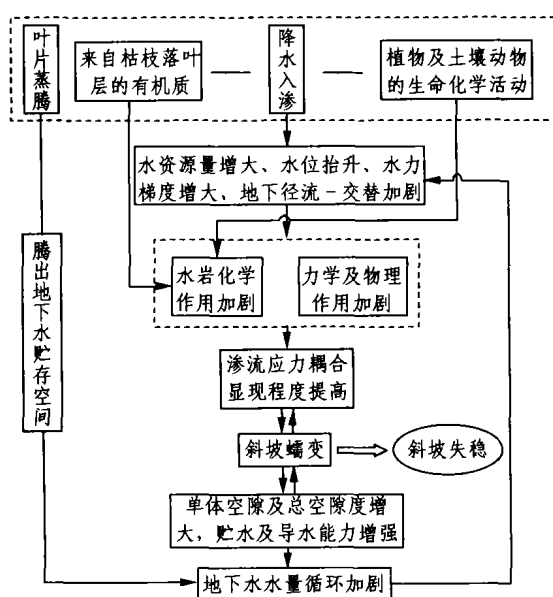


图 5 植被与斜坡演化的关系

Fig.5 The relation between vegetation cover and slope evolution

4.1 植被对地下水补给的影响

节 3 的分析表明,蒸腾在地下水排泄中的作用是显著的。蒸腾会造成土体含水量下降,而砂粘土低含水率条件下的收缩-裂化行为使得植被下的土体也能形成干裂缝(图 6(a), (b))。植被及枯枝落叶层为动物提供食物和保护,而动物的洞穴所构成的空隙网络在许多情况下都可达到相当大的规模,而且具有比一般空隙更好的水稳定性。据文[29]报道,在肥沃的橡树林中,每公顷土体中有 $500 \times 10^4 \sim 700 \times 10^4$ 条蚯蚓,而无林土体中只有 $5 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$ 条。据本文统计,在侧柏-桉树-刺槐混交人工林中,每平方米就有直径 2~8 mm 的动物通道 50~100 个(图 6(c))。植物生长过程中,由于根系-岩土体间的不协调变形,会形成平行根系界面的管状虚

脱;根系生长所产生的轴压将引起顶部自由的岩土体的膨胀与裂化(图 6(d))。此外,植被根系腐烂后也会形成不同尺度的管状空间。

枯枝落叶层在促进降水入渗方面发挥着重要作用,不仅可以防止雨滴击溅引起的土粒分散及表面结皮,同时可以过滤泥砂,防止颗粒阻塞前述各类空隙。此外,枯枝落叶降解形成的腐殖质还可以使土体形成良好的团粒结构及结构性大孔隙。

相对于基质孔隙,上述干裂缝、动物通道、膨胀裂缝及结构性孔隙等可以在岩土体中构成重要的大空(孔)隙系统(macropore system)。由于这些大空隙的上部往往是由处于半腐化状态的枯枝、落叶或含有枯枝落叶的土体构成,加之受到植被及新鲜枯枝落叶层的保护,具有相当程度的稳定性。降雨过程中,这些稳定的大空隙内将形成流态复杂、对地下水补给极为重要的优先流(preferential flow)^[38-40],将加快、加大地下水获得补给的时间及补给量。

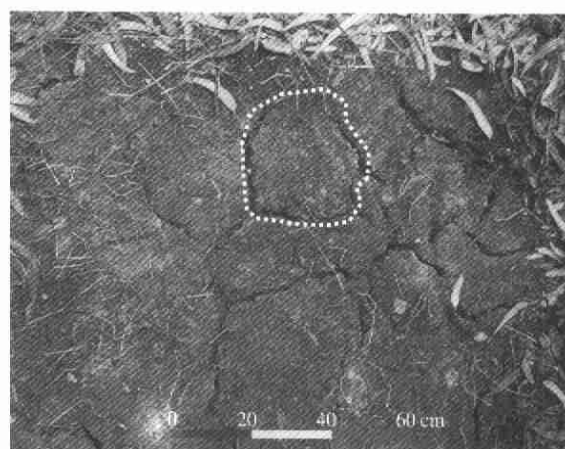
在植被不发育,甚至无植被的土体中,也会不同程度地发育大空隙系统,但由于缺乏有效保护,其水稳定性一般较差,降雨后不久就会逐渐消失。

植被影响斜坡地下水补给的直观表现是土体渗透行为及地表径流特征的变化。据文[29]报道, Mistry 等(1965)在印度必哈邦记录的林下土体渗透率达 260 mm/h,而对应草地和农地分别仅为 120 和 90 mm/h; Tejwani 等(1975)在印度百乐瑞地区测定的林下渗透率为 112 mm/h,而农田为 10 mm/h; Kartawinata 等(1981)在印度尼西亚东加里曼丹省原始热带雨林区某斜坡测定的土体渗透率高达 2772 mm/h。Dunne(1978)的类似研究表明,良好的森林土体的稳定入渗率一般都在 80 mm/h 以上^[41]。日本岩手县和北京林业大学分别在北海道和山西吉县测定的不同植被条件下的土体渗透性(图 7、表 5)可以更清楚地表明植被对降水入渗的影响。

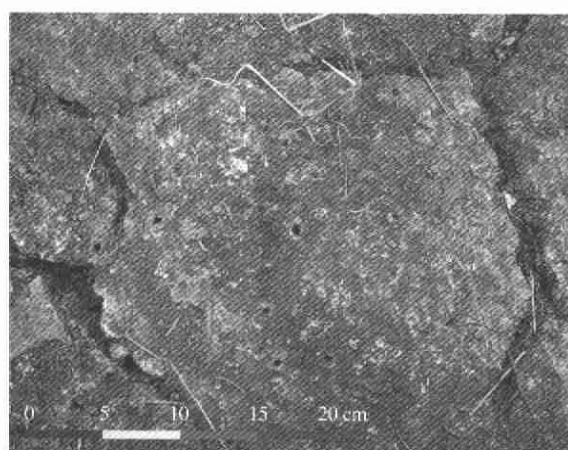
植被发育山区地表径流方面已经积累了许多现场测定资料。Dabin(1957)在象牙海岸进行的现场测定表明,在一次 193 mm 的暴雨期间,地表径流系数只有 1%~3%,最大为 7.8%; Cailleux(1959)指出,在法属圭亚那的主要热带雨林区,地表径流十分微弱^[29]。据文[13]报道,我国山西西部黄土高原林区地表径流系数小于 0.02%,而裸地则为 0.1%(表 6);吉林伊春红松林林地的地表径流系数为 1.8%,皆伐迹地为 12.4%;四川米亚罗原始云杉、冷杉林地坡面径流系数为 0.04%~0.2%,皆伐迹地为 0.2%~0.4%;海南尖峰岭热带雨林区的地表径流系数只有



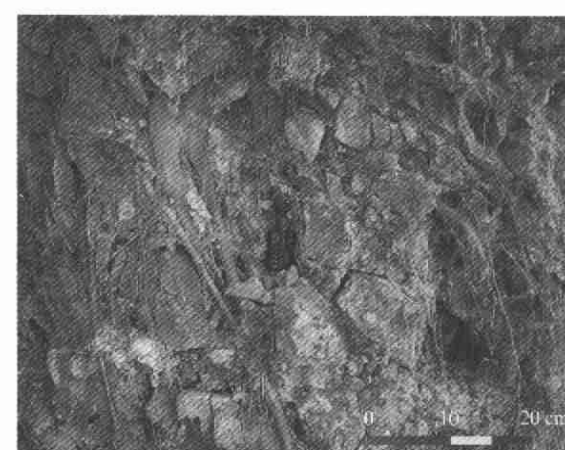
(a) 被树及侧柏下的枯枝落叶层



(b) 枯枝落叶层下的网状干裂缝((a)中虚线内的区域)



(c) 枯枝落叶层下的动物通道((b)中虚线内的区域)



(d) 泥灰岩中的小叶朴根系

图 6 与植被有关的岩土体空隙

Fig.6 Pores in soilmass and rockmass related to vegetation cover

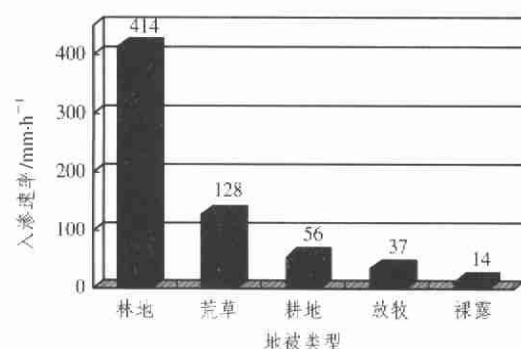


图 7 日本北海道不同植被下土体的渗透率(mm/h)^[13]

Fig.7 Infiltration rates (mm/h) of soils under different vegetation covers in Hokkaido, Japan^[13]

表 5 不同地类 30 min 内的累积入渗量^[13]

Table 5 Accumulative infiltration of soils under different vegetation covers in 30 min^[13] mm

地类	植被种类				
	灌木林	油松林	刺槐林	荒草地	农耕地
阴坡	708.3	166.5	152.8	77.2	94.1
阳坡	179.2	61.5	78.4	94.8	28.4

表 6 黄土地区不同植被条件下的地表径流^[13]

Table 6 Overland flow under different vegetation conditions in loess area^[13]

植被条件	年降雨量/mm	地表径流量/mm	地表径流系数/%	坡度/°
刺槐林	293.4	0.001 7	0.000 6	26.5
油松林	368.6	0.071 1	0.019 3	27.0
虎榛子林	368.6	0.057 3	0.015 5	28.0
沙棘林	368.6	0.016 1	0.004 4	24.5
草地	368.6	0.053 4	0.014 5	27.0
裸地	368.6	0.296 7	0.080 5	

0.23%~0.82%。此外,目前我国运营的铁路、公路路基边坡一般都设置了地表排水系统,但据文[42]对成渝、南昆等干线铁路、楚雄—大理高速公路及南方部分大型斜坡变形体的现场调研,许多斜坡的地表排水系统都没有发挥应有的作用,原因就在于

这些斜坡的植被相对发育(一般为灌木、果园或农田),地表径流微弱,排水系统无水可排。

上述资料表明,植被对地下水补给的促进作用是十分显著的。植被发育地区良好的入渗条件使得地表径流十分微弱,甚至可以忽略^[13, 29],即降水除了拦截损失外,其他全部补给了地下水,植被极大地优化了地下水的补给环境(补给量和补给进程),提高了地下水的径流模量。

植被在斜坡地下水补给中的积极作用在调节区域水循环、遏制流域洪水灾害及面状水土流失等许多方面都是有益的,但对斜坡稳定却是不利的。降雨转化的地下水是斜坡蠕变、滑坡孕育及失稳的最主要的诱发因素^[25, 43~45],排水一直是斜坡加固的重要手段之一,而主动排水,即把降水拦截在斜坡之外,又是斜坡排水的最有效方式,但面状发育的植被使得这种努力几乎成为不可能。

4.2 植被发育斜坡的地下水循环

水文学和水文地质学因分别以地表水和地下水为研究对象而分属 2 个独立学科,但许多情况下彼此的研究成果对于对方都有重要的借鉴意义。20 世纪 70 年代兴起的斜坡水文学(hillslope hydrology)理论,特别是温湿气候条件下,山区森林流域溪流(streamflow)产流机制方面的研究进展,对于深入理解植被发育斜坡的地下水循环具有重要意义。

20 世纪 60 年代以前,用于解释地表径流形成机制的主要是霍顿超渗产流理论,即当降雨强度超过表层土体的入渗率时,就会产生地表径流(Horton overland flow);60 年代末以来大量现场研究^[29, 46, 47]表明,森林(植被)环境下的降雨强度很少能够超过

土体入渗强度,经典霍顿产流机制不能解释植被发育环境下的径流形成机制。

文[48~50]总结出关于溪流产流机制的 3 种学说:

(1) 部分源区-地表径流说(partial area-overland flow)。

斜坡中某些受控于土体特征的特定区域被渗入水从上部饱和后,这些部位的雨水便以地表径流的形式补给溪流,当不同规模的上层滞水水位上升时,就可能出现这种情况。

(2) 可变源区-地表径流说(variable source area-overland flow)(或称可变源区-饱和地表径流 variable source area-saturation overland flow)。

降水过程中,地下水位的抬升使某些区域从下部被饱和;这些区域一般位于坡脚-溪流附近,并可能随降水情况扩大或收缩;来自这些区域的水(包括雨水和溢流的地下水)便以地表径流的形式补给溪流。

(3) 可变源区-地下径流说(variable source area-subsurface stream flow)。

水从斜坡向溪流的运移是通过地下通道实现的,这些通道中的水流可以是基质孔隙中的饱和-非饱和达西流,也可能包括根孔及动物通道等大空隙中的紊流。对于实际斜坡-溪流体系,地下水补给溪流的上述 3 种模式可能共存(图 8);不同条件下,每种方式的贡献可能有所差异^[51],但最主要、最普遍的则是可变源区-地表径流,即蓄满产流^[13]机制。

显然,传统水文学及水文地质学关于“地下水

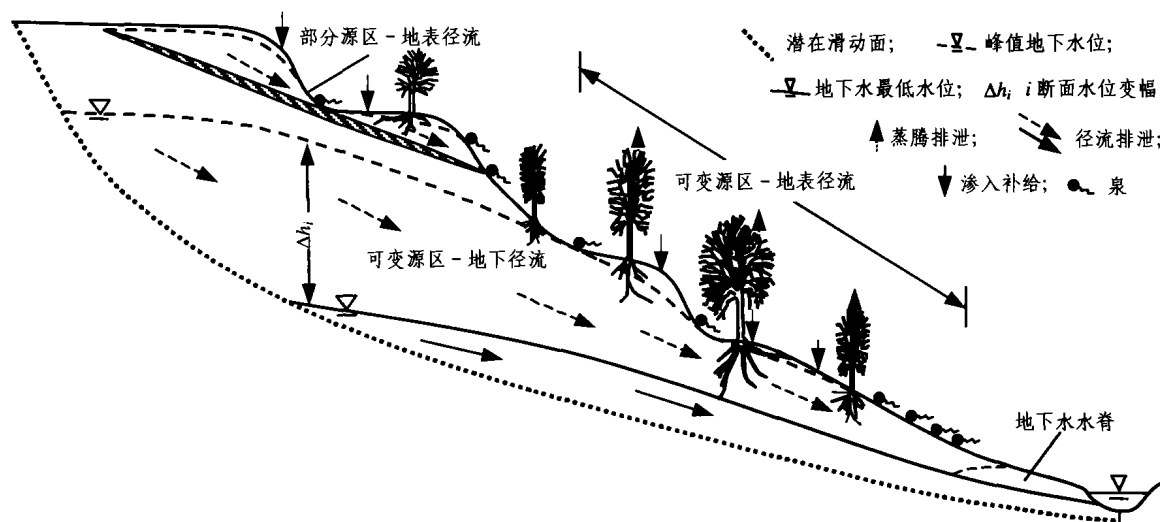


图 8 植被发育斜坡地下水循环及溪流产流模式

Fig.8 Model of groundwater circulation and streamflow generation in vegetated slope

对降雨的响应(相对)迟钝, 降雨期间仍以基流(base flow)流量稳定排泄, 很少成为地表径流洪峰形成的主要因素, 其作用仅限于枯水季节或2次降雨之间向河流提供补给”的评价低估了地下水对地表水的贡献^[51, 52]。文[48]提出, 在植被发育山区, 丰水期河流洪峰流量的80%以上都来自地下水。文[51]对日本一面积为0.022 km²的森林排泄盆地(谷底、谷坡坡度分别为10%, 50%)的暴雨径流过程进行了为期4 a的现场观测, 结果表明, 没有出现霍顿表径流; 总降雨量超过50 mm时, 在平缓的谷底出现了饱和和地表径流, 但即使在大暴雨期间, 陡坡区域也未出现地表径流; 溪流总排泄量的90%以上来自地下水, 来自地表径流的不足10%。

在植被发育的山区, 径流相对滞缓的地下水一般在大雨后的数小时内就可大量补给河流并形成洪峰(图9)。文[48, 49]以R. M. Ragan(1968)的研究成果为基础^[51], 根据现场观测及数值模拟结果提出地下水的脊化效应(groundwater ridging effect)(图8)来解释其对降雨事件的快速响应。在河岸及斜坡坡脚等排泄边界附近, 地下水位和毛细带(capillary fringe)上部边界的埋深较小; 降雨开始后不久, 渗入水就将近地面的张性饱和和毛细水(tension-saturated capillary fringe)转变为压力饱和带(pressure-saturated zone)或称地下水脊, 促使地下水快速补给河流。该水脊不仅为已经处于排泄区的地下水提供早期排

泄动力, 而且增大了排泄边界的面积; 随着降雨的持续, 斜坡上部地下水对溪流补给所发挥的作用将越来越大。文[50, 53]通过室内试验和现场观测证实, 降雨过程中, 毛细带确实能够导致地下水位的迅速抬升, 并将这种抬升在溪流附近形成的水位异常现象称为水位岗(water-table mound)(图10)。此外, 文[51]还建议用管流(pipe flow)及大孔隙流来解释地下水排泄对降雨的快速响应。

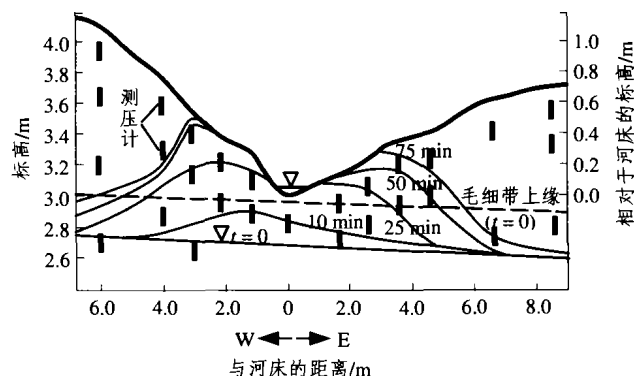


图10 加拿大某青草覆盖砂质斜坡含水层-溪流系统对降雨的响应过程^[50]

Fig.10 Water-table response for a grass covered shallow sandy aquifer-stream system in Canada to a rain event^[50]

对于接受降雨补给的斜坡, 某次降雨事件后, 斜坡内的地下水可以划分为事件水(event water), 事件前水(pre-event water)或新水(new water)以及老水(old water)^[48~50]; 借助环境同位素(尤其是氦)、示踪试验及常规水文学测量等方法可以对新水及老水进行识别(图9)。据文[49, 52]报道, 新西兰某林区一个面积为2.8 km²的流域内, 5次降雨形成的溪流洪峰流量中有74%~97%来自老地下水; 文[54]的研究进一步证实, 在斜坡及零到二级流域的空间尺度上, 在山区森林流域, 几乎所有水文图的大部分都是由老水构成的。文[50]对加拿大某青草覆盖的砂质斜坡含水层-溪流系统的现场观测表明, 降雨初期溪流主要接受斜坡下部含水层的补给, 老水占38%~50%, 而后期则主要接受斜坡中上部地下水补给, 老水占有更大的比例。文[50]基于流网分析提出, 正是由于水位岗的形成, 使得流线加长、老水对溪流的贡献加大。此外, 来自新西兰、加拿大等国家草地流域的研究成果也表明, 老地下水对溪流峰值流量的贡献可达40%~60%^[54]。

通过上述分析, 可以得出如下结论:

(1) 在植被发育的山区, 不同序次地表河流在雨季出现水位上涨, 甚至发生洪水是常见的; 溪流

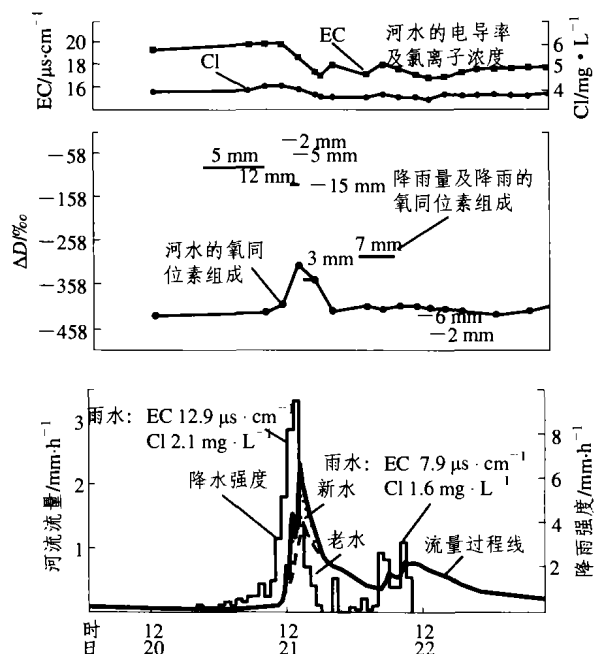


图9 新西兰某植被发育流域的水文图及水量构成^[49]

Fig.9 Storm hydrograph of some catchments on September 20~22, in 1983, in New Zealand, showing separation of old and new water components^[49]

产流机制及河水几乎全部来自地下水这一事实说明,斜坡岩土体被整体或局部“蓄满”是常见的,这对于斜坡稳定是危险的。水-力耦合范围及显现程度的提高可使斜坡应力环境在短时间内恶化到极限,加剧斜坡蠕变(图 5),甚至诱发不同深度的滑坡,如:与部分源区-地表径流有关的美国 Santa Cruz 滑坡及香港大屿山岛群发性滑坡,与深层地下水有关的我国华蓥山溪口滑坡、日本四国岛 Zentoku 蠕变滑坡、法国 La Clapiere 及 Sechilienne alpine 蠕变滑坡等^[22, 25, 28, 43, 55]。

(2) 雨季的一次或几次降雨可使斜坡含水层水位大幅抬升,甚至被“蓄满”。第 3 节的分析表明,降雨间歇期内植被的蒸腾作用是显著的,这样,并存的植被蒸腾与地下径流就可使地下水位在下次降雨或下个雨季来临之前大幅回落,为地下水的再次补给腾出空间,如此往复,形成不同于一般地下水^[56]的“渗入-径流-蒸腾”复合型水循环(图 8)及浸润曲面大幅频繁波动的动态格局。因此,从斜坡水循环的角度,植被蒸腾不仅无助于斜坡稳定,而且还具有加剧斜坡演化、促进滑坡孕育的副作用。

由于斜坡蠕变、地下水潜蚀及其相互作用^[25]会导致岩土体的空隙度增大,导水、“蓄水”能力增强,因此,植被发育斜坡地下水的“渗入-径流-蒸腾”过程不是简单的等量重复,时间尺度上相临循环之间无论在容水度及水力传导系数等参数方面,还是在水力梯度等渗流要素方面,都将发生不同程度的变化,而总体演化趋势是地下水径流模数将持续增大。与此相对应,斜坡岩体的整体性及综合质量将发生渐进性衰退,地下水对应力场的影响程度提高,为降雨及地震诱发斜坡整体滑移奠定基础(图 5)。

(3) 植被发育斜坡中的地下水可以在同一雨季不同降雨事件之间、不同降雨周期之间或不同雨季之间实现新老交替(据文[54]报道,地下水在新西兰 Maimai 流域斜坡中的平均滞留时间只有约 3 个月),这一现象的发现及逐步证实,为 20 世纪中后期以来水文学及水文地质学领域所取得的重要进展之一,同时具有深远的多学科意义。

就象碳酸岩的岩溶化过程一样,对于水岩比 W/R(water/rock)一般较低天然岩土-水体系中的 CWRI 来说,由于补给水的侵蚀性不可能达到很高水平,地下水的及时更新与交替就显得尤为重要,可以使水岩交换相饱和度^[57]始终处于较低水平,保证 CWRI 在时间上的连续性,这对于斜坡演化及

滑坡孕育是十分关键的^[58]。

据文[5]的研究,每年约有 7×10^8 t 的 CO_2 通过陆地 CWRI(化学风化)由大气和土体中转入海洋,其中硅酸盐矿物水岩反应的贡献在 50% 以上。由于地下水径流对 CWRI,尤其是反应速率很低的硅酸盐矿物的 CWRI,具有重要的控制作用,植被发育斜坡内地下水的新老交替对于全球碳循环及气候变化研究具有重要的借鉴意义。

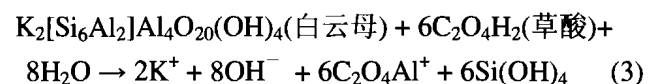
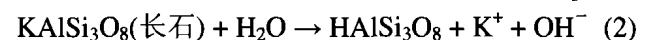
4.3 植被与斜坡 CWRI

植物光合作用吸收大气中的 CO_2 并释放出 O_2 ,而根系呼吸恰好是一个相反的过程,即吸收 O_2 并向土体中释放 CO_2 。尽管后者的规模要比前者小得多,但它却可以使土体中 CO_2 的分压提高到大气中的 10~100 倍^[5]。此外,植被发育土体中生存的大量动物及微生物的新陈代谢也会产生 CO_2 、可溶性有机酸及酸性有机残余物等^[59],提高土体溶液的酸度。

植物生长需要从土体中吸收 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ 及 SO_4^{2-} 等无机盐离子作为营养。这一过程不仅会使大多具有可逆性的水岩反应向“溶解”方向移动,而且由于对阴、阳离子的不平衡吸收,根系还会向外分泌 H^+ 及其他酸性物质,有时这种效应可以使根际土体的 pH 值比背景值降低 2 个单位^[5, 59]。

枯枝落叶及死亡根系经腐化过程转变为主要由胡敏酸(HA)和富里酸(FA)组成的腐殖质;由于所含 COOH 基和 OH 基可以解离出 H^+ , HA 和 FA 呈弱酸性,而其降解的最终产物也以草酸、醋酸及 CO_2 等酸性物质为主,因此,枯枝落叶在为土体提供酸储备的同时,对降低土体酸度也具有实际贡献。

包气带土体是降水补给地下水必须通过的第一道屏障,植被的上述生物地球化学过程将显著提高渗入水的酸度。则水岩反应式为



如式(1)~(3)所示的岩石钙质胶结物及硅酸盐造岩矿物的非全等溶解(最重要、最普遍的水岩反应)等,都是在酸性环境下进行的,植被可以提高渗入水对斜坡岩体的侵蚀性,促进斜坡 CWRI 的规模及进程。

从静态的角度看,地下水的化学特征及其与岩石特征的对比对斜坡 CWRI 是重要的,但由于大部分水岩反应都是速率很低的可逆反应,只有已经与

岩石达到平衡或接近平衡的地下水及时排泄, 低矿化、高侵蚀性的新水及时补充, 水岩反应综合体系才能远离平衡态, CWRI 才能持续不断地进行。节4.2的分析表明, 雨季植被发育斜坡内地下水的新老交替, 使得 CWRI 持续进行的水循环条件得到满足。

斜坡排泄地下水中 HCO_3^- 的浓度可以被视为植被参与、促进斜坡 CWRI 的一个重要标志。据节4.2的分析, 植被发育山区的河流主要源于地下水的补给, 因此, 通过河流中的 HCO_3^- 浓度可以判断植被对斜坡 CWRI 的贡献。据文[60]报道, 在爱尔兰, 同为玄武岩的流域, 植被发育地区溪流中 HCO_3^- 的浓度是裸露岩石区的 2~10 倍; 在瑞士南部的阿尔卑斯山地区, 落叶林区地表水中 HCO_3^- 的浓度比裸露岩石区高出 10 倍。

据文[61]报道, 在夏威夷, 地衣覆盖地区 CWRI 的加速度至少是岩石裸露区的 10~100 倍; 由于地衣附着, 热带地区熔岩化学风化率提高了 4~10 倍; 热带雨林区的化学剥蚀率一般为 0.05 mm/a, 如果没有植被, 全球表面岩石的化学剥蚀率将低于 5×10^{-5} mm/a, 即不足原来的 1/1 000。

因此, 植被对斜坡 CWRI 的贡献既体现在对渗入水侵蚀性的影响方面, 也体现在对斜坡水量循环的控制方面。

5 结 语

(1) 根系对土体的力学强度加固效应是显著的, 但这种效应一般仅存在于地表以下 1.5 m 的深度范围内; 某些深根性植物的根系可以到达 5 m 以下的深度, 但这一深度范围内, 无论单根的直径, 还是根系的总体密度都已大幅度衰减, 其加固效应已十分有限。因此, 尽管植被可以遏制面状水土流失及浅层滑坡, 但在深层滑坡的防治方面, 其作用是有限的。

(2) 蒸腾作为植被发育斜坡地下水垂向排泄的重要途径, 耗水量一般都在当地降雨量的 20% 以上。由于其主要发生在降雨间歇, 而且速率很低, 不能遏制暴雨或连续降雨期间斜坡地下水位短时间内的大幅抬升, 不能显著改善斜坡的稳定状况。相反, 通过改善斜坡水循环, 蒸腾对斜坡蠕变及滑坡孕育还会产生助推作用。

(3) 与植被相关的干裂缝、动物通道、膨胀裂缝及结构性孔隙等在岩土体中形成的相对稳定的大

空(孔)隙系统可以显著优化地下水的补给环境, 使得斜坡能够吸收除拦截损失之外的几乎所有降雨。据溪流产流机制及河流动态, 在雨季, 植被发育斜坡岩土体被整体或局部“蓄满”是常见的, 由此引起的水-力耦合范围及显现程度的提高可以使斜坡应力环境在短时间内恶化到极限, 加剧斜坡蠕变, 甚至诱发不同深度的滑坡。

(4) 植被使得斜坡地下水呈现出“渗入-径流-蒸腾”复合型水循环模式及浸润曲面大幅频繁波动的动态格局; 在时间尺度上, 相临循环之间无论在渗流要素方面还是在介质水力学-力学参数方面, 都将发生不同程度的变化, 而其总体趋势是地下水径流模数持续增大、岩体的连续性、整体性及综合质量发生渐进性衰退, 为斜坡整体滑移奠定基础。

(5) 植被发育斜坡中新老地下水的快速交替可以使水岩交换相饱和指数始终处于较低水平, 保证 CWRI 在时间上的连续性, 这对于斜坡演化及滑坡孕育是十分关键的, 甚至是决定性的。

(6) 植物根系呼吸、土体动物及微生物的新陈代谢、植物生长对土体无机盐离子的选择性吸收、枯枝落叶及死亡根系的腐化过程与最终降解等生物地球化学过程, 会向土体中释放 CO_2 、胡敏酸、富里酸及草酸等酸性物质, 提高渗入水的酸度及侵蚀性, 促进大多在酸性环境下进行的各类水岩反应。

综合上述(3)~(6), 不难看出, 植被对斜坡蠕变及深层滑坡孕育的贡献是显著的。

参考文献(References):

- [1] 解明曙. 乔灌木根系固坡力学强度的有效范围与最佳组构方式[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 17-24.(Xie Mingshu. A study on determining the effective limits of the tree and bush roots strength and the best distribution of roots for stable slopes[J]. Acta Conservations Soliet Aquae Sinica, 1990, 4(1): 17-24.(in Chinese))
- [2] 王玉杰, 解明曙. 三峡库区花岗岩山地林木对坡面稳定性影响的研究[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(4): 7-11.(Wang Yujie, Xie Mingshu. Effects of forests on slope stability in the granite mountainous area of the Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1997, 19(4): 7-11.(in Chinese))
- [3] 徐永年. 人类活动及植被对坡体滑塌的影响[J]. 泥沙研究, 1999, (3): 33-39.(Xu Yongnian. Influence of human activities and vegetations on landslides and avalanches[J]. Journal of Sediment Research, 1999, (3): 33-39.(in Chinese))
- [4] Nilaweera N S, Nutalaya P. Role of tree roots in slope stabilization[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, (57):

- 337 - 342.
- [5] 李晶莹, 张 经. 流域盆地的风化作用与全球气候变化[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 411 - 419.(Li Jingying, Zhang Jing. Weathering of watershed basins and global climatic change[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(3): 411 - 419.(in Chinese))
- [6] Cannon, S H, Powers P S, Phil R A, et al. Preliminary evaluation of the fire-related debris flows on Storm King Mountain[R]. Colorado: Glenwood Springs, 1995. 95 - 508.
- [7] 胡适友. 新型框格护坡的设计与实践[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 116 - 120.(Hu Shiyou. Design and practice of slope protection with new frame[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(2): 116 - 120.(in Chinese))
- [8] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态种植基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 239 - 242.(Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Testing study on planting material for rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 239 - 242.(in Chinese))
- [9] 冯俊德. 路基边坡植被护坡技术综述[J]. 路基工程, 2001, (5): 20 - 23.(Feng Junde. A review: stabilizing subgrade slopes with vegetation[J]. Subgrade Engineering, 2001, (5): 20 - 23.(in Chinese))
- [10] 张咸恭, 王思敬, 张倬元等. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.(Zhang Xiangong, Wang Sijing, Zhang Zhuoyuan, et al. Engineering Geology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.(in Chinese))
- [11] 张倬元. 滑坡防治工程的现状与发展展望[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 89 - 97.(Zhang Zhuoyuan. The present status, technical advance and development trend of landslide remedial measures[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(2): 89 - 97.(in Chinese))
- [12] Coppin N J, Richards I G. Use of Vegetation in Civil Engineering[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1990.
- [13] 王治国, 张云龙, 刘徐师等. 林业生态工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.(Wang Zhiguo, Zhang Yunlong, Liu Xushi, et al. Forest Ecological Engineering[M]. Beijing: China Forest Publishing House, 2000.(in Chinese))
- [14] 李 鹏, 李占斌, 赵 忠. 渭北黄土高原不同立地上刺槐根系分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 22(5): 15 - 19.(Li Peng, Li Zhanbin, Zhao Zhong. Researches on root distribution characters of robinia pseudoacacia on different sites in Weibei loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(5): 15 - 19.(in Chinese))
- [15] 于学仁, 董晶磊, 于 雷. 草坪植物地下器官垂直分布的研究[J]. 东北农业大学学报, 1996, 27(4): 358 - 361.(Yu Xueren, Dong Jinglei, Yu Lei. Study on perpendicular distribution of subterranean organ of turf grass[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 1996, 27(4): 358 - 361.(in Chinese))
- [16] 漆智平, Rao I M, Ricaurte J. 象草和壮丽草根系空间分布及养分吸收研究[J]. 草地学报, 1999, 7(1): 22 - 27.(Qi Zhiping, Rao I M, Ricaurte J. Study on root space distribution in soil and nutrient uptake in elephant grass and imperial grass[J]. Acta Agrestia Sinica, 1999, 7(1): 22 - 27.(in Chinese))
- [17] 史敏华, 王 隽. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初步[J]. 山西林业科技, 1994, (1): 17 - 19.(Shi Minhua, Wang Di. Preliminary study on the distribution and anti-pull capacity of shrub root system in limestone region[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 1994, (1): 17 - 19.(in Chinese))
- [18] 韩有志, 梁胜发. 华北落叶松人工林根系分布及根系生物量研究[J]. 山西林业科技, 1997, (3): 36 - 40.(Han Youzhi, Liang Shengfa. A research on the tree root distribution and biomass of North-China larch[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 1997, (3): 36 - 40.(in Chinese))
- [19] 张锦春, 汪 杰, 李爱德等. 樟子松根系分布特征及其生长适应性研究[J]. 防护林科技, 2000, (3): 46 - 49.(Zhang Jinchun, Wang Jie, Li Aide, et al. Research on root distribution and growth adaptability of pinus sylvestris var. mongolica[J]. Protection Forest Science and Technology, 2000, (3): 46 - 49.(in Chinese))
- [20] 王 成, 金永焕, 刘继生等. 延边地区天然赤松林单木根系生物量的研究[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(1): 44 - 49.(Wang Cheng, Jin Yonghuan, Liu Jisheng, et al. Root biomass of natural Japanese red pine in Yanbian area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1999, 21(1): 44 - 49.(in Chinese))
- [21] 赵 忠, 李 鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 37 - 39.(Zhao Zhong, Li Peng, Wang Naijiang. Distribution patterns of root systems of main panting tree species in Weibei loess plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(1): 37 - 39.(in Chinese))
- [22] 黄润秋, 邓荣贵, 张倬元. 高边坡物质运动全过程模拟[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.(Huang Runqiu, Deng Ronggui, Zhang Zhuoyuan. Full-course Numerical Simulation of High Slope Material Movement[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1993.(in Chinese))
- [23] Burns W J. Engineering geology and relative stability of the southern half of Newell creek canyon[M. S. Thesis][D]. Oregon: Portland State University, 1999.
- [24] 钟立勋. 中国重大地质灾害实例分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 1 - 10.(Zhong Lixun. Case study on significant geo-hazards in China[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(3): 1 - 10.(in Chinese))

- [25] Furuya G, Sassa K, Hiura H, et al. Mechanism of creep movement caused by landslide activity and underground erosion in crystalline schist, Shikoku Island, Southwestern Japan[J]. Engineering Geology, 1999, (53): 311 - 325.
- [26] 孙德永. 南昆铁路八渡滑坡工程整治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.(Sun Deyong. Badu Landslide Treatment in Nankun Railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000.(in Chinese))
- [27] 林懂明, 皮良友, 黄海浪等. 南昆线八渡 K343 滑坡的工程地质条件及治理研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 220 - 224.(Lin Dongming, Pi Liangyou, Huang Hailang, et al. Study on engineering geology conditions for landslide at Badu K343 section Nankin railway and control on it[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(2): 20 - 225.(in Chinese))
- [28] Guglielmi Y, Vengeon J M, Bertrand C, et al. Hydrogeochemistry: an investigation tool to evaluate infiltration into large moving rock masses(case study of La Clapiere and Sechilienne alpine landslides)[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2002, 61: 311 - 324.
- [29] Reynolds E R C, Thompson F B. Forests, Climate, and Hydrology-Regional Impacts[M]. Tokyo: United Nations University Press, 1998.
- [30] 高 人, 周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型的蒸腾作用[J]. 辽宁农业科学, 2001, (6): 5 - 8.(Gao Ren, Zhou Guangzhu. Transpiration effects of various major forest vegetation types in eastern Liaoning mountainous region[J]. Liaoning Agricultural Science, 2001, (6): 5 - 8.(in Chinese))
- [31] 杨 劫, 高清竹, 李国强等. 皇甫川流域主要人工灌木水分生态的研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 87 - 94.(Yang Jie, Gao Qingzhu, Li Guoqiang, et al. A study on the water ecology of dominant artificial shrubs in Huangpuchuan watershed[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(1): 87 - 94.(in Chinese))
- [32] 周 平, 李吉跃, 招礼军. 北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 50 - 55.(Zhou Ping, Li Jiyue, Zhao Lijun. Characteristics of seedlings water consumption by transpiration of main afforestation tree species in North China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6): 50 - 55.(in Chinese))
- [33] 阮成江, 李代琼. 黄土丘陵区人工沙棘蒸腾作用研究[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2 141 - 2 146.(Ruan Chengjiang, Li Daiqiong. Study on the transpiration of artificial hippophae rhamnoides L. forest in the loess hilly region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12): 2 141 - 2 146.(in Chinese))
- [34] 黄润秋, 张倬元, 王士天. 高边坡稳定性的系统工程地质研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.(Huang Runqiu, Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian. Systematical Engineering Geology Researches on the Stability of High Slopes[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1991.(in Chinese))
- [35] 龙 辉, 秦四清, 万志清. 降雨触发滑坡的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 502 - 508.(Long Hui, Qin Siqing, Wan Zhiqing. Catastrophe analysis of rainfall-reduce landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 502 - 508.(in Chinese))
- [36] 黄润秋. 岩石高边坡的时效变形分析及其工程地质意义[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 148 - 153.(Huang Runqiu. Time-dependent deformation of a high rock slope and its engineering-geological significance[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(2): 148 - 153.(in Chinese))
- [37] Malan D F. Time-dependent behavior of deep level tabular excavations in hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32: 123 - 155.
- [38] 秦耀东, 任 理, 王 济. 土壤中大孔隙流研究进展与现状[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 203 - 207.(Qin Yaodong, Ren Li, Wang Ji. Review on the study of macropore flow in soil[J]. Advance in Water Science, 2000, 11(2): 203 - 207.(in Chinese))
- [39] El-Kadi A I, Torikai J D. Identifying variably saturated water-flow patterns in a steep hillslope under intermittent heavy rainfall[J]. Hydrogeology Journal, 2001, (9): 231 - 242.
- [40] Scanlon B R, Healy R W, Cook P G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge[J]. Hydrogeology Journal, 2002, (10): 18 - 39.
- [41] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究进展, 1998, (6): 14 - 23.(Wang Lixian, Zhang Zhiqiang. Advance in the study of eco-hydrological effects from vegetation changes[J]. World Forest Research, 1998, (6): 14 - 23.(in Chinese))
- [42] 徐则民, 杨立中, 黄润秋. 路基边坡水岩相互作用机理及病害防治[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000.(Xu Zemin, Yang Lizhong, Huang Runqiu. Mechanisms of Water-Rock Interaction in Subgrade Slopes and Hazard Control[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2000.(in Chinese))
- [43] Reid M E, Nielsen H P, Dreiss S J. Hydraulic factors triggering a shallow hillslope failure[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1988, (25): 349 - 361.
- [44] Toth J. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations[J]. Hydrogeology Journal, 1999, (7): 1 - 14.
- [45] 沈照理, 王焰新. 水 - 岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2002, 27(2): 127 - 133.(Sheng Zhaoli, Wang Yanxin. Review and outlook of water-rock interaction studies[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002,

- 27(2): 127 - 133.(in Chinese))
- [46] Bonell M. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 150: 217 - 275.
- [47] 张志强, 王礼先, 余新晓等. 森林植被影响径流形成机制研究进展[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 79 - 84.(Zhang Zhiqiang, Wang Lixian, Yu Xinxiao, et al. Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms: a review[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 79 - 84.(in Chinese))
- [48] Sklash M G, Farvolden R N. The role of groundwater in storm runoff[J]. *Journal of Hydrology*, 1979, 43: 45 - 65.
- [49] Sklash M G, Stewart M K, Pearce A J. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 2. a case study of hillslope and low-order stream response[J]. *Water Resour. Res.*, 1986, 22: 1 273 - 1 282
- [50] Abdul A S, Gillham R W. Field studies of the effects of capillary fringe on streamflow generation[J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 112: 1 - 18.
- [51] Tanaka T, Yasuhara M, Sakai H, et al. The Hachioji experimental basin study storm runoff processes and the mechanism of its generation[J]. *Journal of Hydrology*, 1988, 102: 139 - 164.
- [52] Mosley M P. Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand[J]. *Water Resour. Res.*, 1979, 15: 795 - 806.
- [53] Abdul A S, Gillham R W. Laboratory studies of the effects of the capillary fringe on streamflow generation[J]. *Water Resour. Res.*, 1984, 10: 691 - 698.
- [54] Pearce A. J. Streamflow generation processes: an Austral view[J]. *Water Resour. Res.*, 1990, 26: 3 037 - 3 047.
- [55] Dai Fuchu, Lee C F, Wang Sijing. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong[J]. *Engineering Geology*, 1999, 51: 279 - 290.
- [56] 王大纯, 张人权, 史毅宏 等编著. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995.(Wang Dachun, Zhang Renquan, Shi Yihong, et al. *An Introduction to Hydrogeology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [57] Plummer L N, Busby J F, Lee R W, et al. Geochemical modeling of the Madison aquifer in parts of Montana Wyoming and South Dakota[J]. *Water Resour. Res.*, 1993, 26: 1 981 - 2 104.
- [58] 徐则民, 杨立中, 黄润秋. 斜坡水岩化学作用问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2 778 - 2 787. (Xu Zemin, Yang Lizhong, Huang Runqiu. Some problems on chemical water-rock interaction in slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2 778 - 2 787.(in Chinese))
- [59] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.(Li Xueheng. *Soil Chemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.(in Chinese))
- [60] Bemer R A. Weathering plants and the long-term carbon cycle[J]. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 3 225 - 3 231.
- [61] Schwartzman D W, Volk T. Biotic enhancement of weathering and the habitability[J]. *Earth Nature*, 1989, 340: 457 - 459.