

娃娃沟流域泥石流活动与植被关系探讨^{*}

施蕾蕾^{1,2,3}, 陈宁生^{1,2}, 杨成林^{1,2,3}, 覃伯勇⁴

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 4. 宣汉市水利局, 四川 宣汉 636150)

摘 要: 娃娃沟位于九龙县境内, 属川西南高植被覆盖山区。2006 年 7 月 16 日该流域暴发大规模泥石流灾害, 此次泥石流容重高, 粗大颗粒比重大, 表现出黏性泥石流的特征。通过解译 TM 遥感影像发现流域内植被覆盖度高达 80%, 森林覆盖率超过 50%, 以针阔叶混交林和针叶林为主。分析发现该流域植被与泥石流活动间存在以下关系: 流域植被对泥石流的抑制作用是有限的, 当泥石流暴发时沟道两侧的部分植被也随失稳土体一起滑入沟道, 成为泥石流固体物质的一部分; 不同植被类型对泥石流活动控制作用有差异, 该区以针阔叶混交林和针叶林为主的植被类型对泥石流活动的控制作用不强。

关键词: 娃娃沟; 泥石流特征; 植被特征; 遥感数据

中图分类号: P642.23; X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)03-0096-04

Relationships Between Vegetation and Debris Flow in Well-vegetated Wawagou Valley

SHI Lei-lei^{1,2,3}, CHEN Ning-sheng^{1,2}, YANG Cheng-lin^{1,2,3}, QIN Bo-yong⁴

(1. Key Laboratory of Mountain Hazard and the Earth's Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China; 4. Water Conservancy Bureau of Xuanhan County, Xuanhan, Sichuan 636150, China)

Abstract: Wawagou valley is located in the southwest mountainous area of Sichuan province, with high vegetation ratio. On July 16, 2006, a large debris flow hazard occurred in Wawagou valley, which is a viscous debris flow. Its concentration is big and transported many big rocks. And frequency of Wawagou valley debris flow is low, but scale is big. Based on TM remote sensing data, it found that vegetation ratio of Wawagou catchment is above 80%, forest ratio is exceed 50%. Coniferous forest and broad-leaved and coniferous mixed forest are the main vegetation types of this area. Analyzing relationships between vegetation and debris flow activity in this valley, some results present. Given it as follows: Firstly, the control effect of vegetation on debris flow activity is limited. Secondly, when debris flow takes place, vegetation on slope will slipping into the channel with failed soil mass. Finally, different types of vegetation have diverse control effect on debris flow activity.

Key words: Wawagou valley; debris flow characteristics; vegetation; remote sensing datum

通常认为茂密的植被能够抑制、削减泥石流活动, 减少泥石流的发生频率^[1-4], 有的甚至根除泥石流形成的可能, 消除泥石流活动^[1]。然而大量实际情况表明, 在国内外高植被地区时仍有泥石流发生, 这类地区出现的泥石流多由暴雨激发, 且一旦暴发其规模都较大, 往往造成巨大的经济损失和人员伤亡。如 1999 年委内瑞拉阿 - 维拉山北坡 20 多条沟发生了群发性泥石流灾害, 造成数万人死亡, 经济损失 20 亿美元, 暴发泥石流的区域植被覆盖率达 90% 以上, 森林覆盖率达 75% 以上^[5]。而在我国植被覆盖良好的山区暴发泥石流的情况也较普遍。如四川四姑娘山双桥沟、九寨沟、丹巴

县岳扎乡鹅狼沟、巴底乡邛山沟、水卡子村的水卡子沟、九龙县娃娃沟、江西庐山犁头尖北坡景区、贵州习水县龙蛇子沟、云南德宏、盈江、腾冲等地均属植被良好地区, 也都曾在不同时间暴发了规模不等的泥石流灾害。其中又以西南山区最为典型, 它是我国泥石流多发区, 同时也是高植被覆盖地区。仅以 2004 年为例, 2004 年 7 月云南腾冲在森林植被覆盖度极高的中北部地区发生滑坡泥石流灾害, 受灾人口 1.76×10^5 人, 受灾面积 2755 hm^2 ^[6]。2004 年 7 月 20 日云南盈江发生滑坡泥石流山洪灾害, 造成 59 人死亡失踪和 15 857 万元财产损失, 盈江县天然植被覆盖度高, 在支那、盏西和苏典

^{*} 收稿日期: 2007-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目“粘粒含量对泥石流源区砾石土强度变化的影响”(40471012)

作者简介: 施蕾蕾(1982 -), 女, 硕士, 主要从事泥石流灾害研究。E-mail: shill @imde.ac.cn

等地,植被覆盖度几近 100%,仍然暴发了严重的滑坡泥石流^[7]。2004 年 7 月 5 日云南德宏州发生特大滑坡泥石流,造成死亡 18 人,失踪 24 人,直接经济损失 4.8 亿元,灾区绝大部分地区植被覆盖良好^[8]。可见,良好的植被并未能阻止泥石流的发生。2006 年 7 月 16 日凌晨四川九龙县娃娃沟暴发大规模泥石流(图 1),泥石流冲毁了位于下游的某电站闸区、电站厂房和另一电站取水口,造成直接经济损失约 6 000 万元。该流域植被情况良好,但仍发生了这样大规模的灾害性泥石流,本文试图分析在娃娃沟泥石流活动与植被的关系,以期为类似地区的泥石流防灾减灾工作提供一定的参考依据。

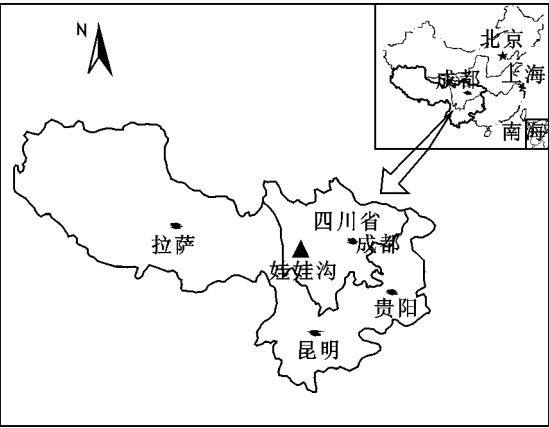


图 1 娃娃沟泥石流位置图

1 研究区概况

娃娃沟位于四川省甘孜藏族自治州九龙县洪坝乡,地理位置 102°01'34" - 102°05'20" E, 29°14'08" - 29°17'50" N。流域海拔 2 025 ~ 5 014 m,相对高差 2 989 m,属于中高山 - 高山地貌。主沟长 5.5 km,中上游主要以“V”字形沟谷为主,常见有跌水坎,沟道坡陡流急,主沟从沟口到上游,沟床比降 69.8‰~121.9‰,支沟发育,多达 17 条,沟长在 2.05 ~ 4.2 km 范围内,沟床比降较大,在 173.6‰~454.0‰范围内。流域中下游有滑坡 5 处,主沟左岸的 4 个滑坡体相连,其中最大滑坡体约高 200 m,宽 180 m,这 5 处滑坡未对此次泥石流造成影响,但是未来是泥石流潜在的物源。该流域地处川西高原东南部边缘,为洪坝河左岸的一级支流,集水区面积 25.62 km²。流域出露地层主要为晚第三系和二叠系。上游区域主要为晚第三纪(N)砾岩、粉砂岩,二叠纪上统(P₂)大理岩夹板岩、变质玄武岩,下游区域主要二叠纪上统(P₂)大理岩、绢云母板岩、变质砂岩。上游支沟变质板岩、砂岩岩层破碎,风化强烈,为泥石流提供了丰富的物源。该流域属中纬度亚热带湿润气候区,干湿分明,雨量充沛。年平均气温为 16.7℃,极端最高气温为 38.4℃,极端最低气温为 3.4℃,多年平均相对湿度为 75%,全年降雨量主要集中在汛期,其中又以 7、8 月份最多,占全年降雨量的 48.5%和 52.8%。流域内植被发育良好,在中高海拔地区分布有茂密的原始森林。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据准备和辅助软件

通过实地调访、野外勘查、测量收集泥石流相关信息和数

据,包括村民调访、测量断面、野外现场配置容重和收集气象资料等;选用 2002 年 4 月 21 日空间分辨率 15 m 的 7 波段 TM 遥感影像数据和 1:50 000 地形图,用于遥感影像处理的辅助软件有 ERDAS 8.5, Arc View 3.3 和 Arc GIS 9.0。

2.2 研究方法

2.2.1 泥石流相关参数计算

(1)泥石流容重计算。采用野外现场配置容重法,黏粒含量和容重的对数关系式法两种方法确定本次泥石流的容重,以便相互校正。野外现场配置容重法。在娃娃沟沟口堆积扇获取泥石流原状堆积物,根据现场目击者的描述在野外配置泥石流浆体,用称重法计算容重。配置容器为高 30 cm,内径 29 cm,重 0.95 kg 的铁桶。配置浆体重 33.65 kg,体积为 16 414.63 cm³,两者相比得到泥石流容重为 2.05 g/cm³。黏粒含量和容重的对数关系式法^[9]。该方法通过对黏性泥石流以及容重和黏粒含量的关系进行对数关系式的计算机模拟,得到泥石流黏粒含量和容重的对数关系式:

$$c = \lg \frac{10x + 0.23}{x - 0.089} / 0.1 + \exp(-20x - 1) + 1.1$$

式中:x——泥石流的黏粒含量。

计算的泥石流容重结果为 2.18 g/cm³。2 种方法计算的泥石流容重值均超过了 2.0 g/cm³,其变化范围在 2.05 ~ 2.18 g/cm³。

(2)泥石流流速和流量的计算。为了具体确定其规模,根据本次泥石流的流体特征和分布位置选取 4 个断面,其中断面 1 为弯道断面,考虑到娃娃沟泥石流容重大于 2.0 g/cm³,属于黏性泥石流范围,因而采用满宁公式计算流速;弯道断面则采用弯道超高法^[10]计算流速。流速计算结果见表 1;采用形态调查法计算泥石流峰值流量,计算结果见表 2。

表 1 娃娃沟泥石流的流速

断面编号	断面面积/ m ²	泥石流泥深/ m	沟床坡度/ (°)	平均流速/ (m·s ⁻¹)
断面 1	74.07	4.04	7	10.78
断面 2	90.02	3.86	4	7.94
断面 3	94.82	4.36	5	8.28
断面 4	69.67	5.74	6	10.9

表 2 形态调查法计算的娃娃沟泥石流流量

断面编号	平均流速/ (m·s ⁻¹)	断面过流面积/ m ²	断面流量/ (m ³ ·s ⁻¹)
断面 1	10.78	74.07	798.5
断面 2	7.94	90.02	714.76
断面 3	8.28	94.82	785.1
断面 4	10.9	69.67	759.03

满宁公式为

$$U_c = (1/n_c) H_c^{2/3} I_c^{1/2}$$

式中:U_c——泥石流过流断面平均流速;H_c——计算断面的平均泥深;I_c——泥石流水力坡度,一般可用河床纵坡代替;n_c——黏性泥石流超滤系数。

弯道超高法公式为

$$U_c = [9hg(a_1 + a_2)/(2a_2 - 2a_1)]^{1/2}$$

式中: a_1 ——弯道凹岸的内径; a_2 ——弯道凸岸的外径;
 $9h$ ——弯道两岸泥位超高值。

形态调查法计算公式为

$$Q_c = A_{sc} \cdot V_c$$

式中: A_{sc} ——调查断面的过流面积; V_c ——通过调查断面的泥石流平均流速。

2.2.2 遥感数据处理

首先是对图像数据的预处理,包括遥感影像的几何校正和研究区的裁剪等工作。根据石棉县 1:50 000 地形图,以 Arc View 3.3 为平台数字化等高线,在 Arc GIS 9.0 中生成研究区的 DEM,用 DEM 对遥感影像进行几何校正。然后为了确定研究区植被的分布特征,选取 TM4、TM3、TM2 波段进行影像合成,在 ERDAS 8.5 软件下,运用图像解译模块,进行图像增强处理,使其较好地突出显示植被信息;最后进行监督分类,通过绘制 AOI 区域来获取分类模版信息,结合实地调查情况,建立流石滩植被、高山灌丛和草甸、亚高山针叶林、针阔叶混交林、落叶阔叶林、水体和积雪等 6 种类型的分类模板,得到研究区植被监督分类影像数据,制作植被覆盖类型图。

3 结果分析

3.1 研究区泥石流特征

3.1.1 属低频泥石流

根据对当地村民的访谈,研究区暴发山洪频率较高,近 40 a 暴发过 3 次,暴发时间分别是 2003 年、1998 年和 1972 年,但除 2006 年暴发的泥石流外还没有暴发过其它泥石流。被调查者中最年长者 65 岁,结合其回忆父母给予的泥石流信息,认定本次泥石流是其所知道的规模最大的一次,因此调访的泥石流历史在 100 a 左右。可推测 2006 年 7 月暴发的泥石流是近百年来该流域规模最大的一次灾害性泥石流。通过调访所获信息判断研究区大规模泥石流的重现周期约为 90~100 a,属低频泥石流。

3.1.2 属黏性泥石流

研究区 2006 年 7 月 16 日暴发的泥石流按流体性质划分属黏性泥石流。采用野外现场配置容重法、黏粒含量和容重的对数关系式法两种方法计算的本次泥石流容重均大于 1.8 g/cm^3 ,由此判定本次泥石流为黏性泥石流,且其容重较大,范围 $2.05 \sim 2.18 \text{ g/cm}^3$ 。其沟道两侧有浓泥浆运动后留下的泥痕,堆积体中泥沙、砾石混杂,大石块多,搬运的最大石块体积达 $6 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,重量约 243 t,反映出泥石流搬运能力强。流速和流量均较大,最大断面流速 10.78 m/s ,最大断面流量达 $798.5 \text{ m}^3/\text{s}$,反映出本次泥石流规模较大。泥石流固体物质的堆积厚度最大达 6.5 m,淤埋位于娃娃沟和洪坝河汇口下游的电站厂房和闸门近 3 m。

3.1.3 属暴发在高植被覆盖地区的泥石流

流域内的植被覆盖良好,植被为典型的亚热带高原山区植被群落,其植被群落从低海拔到高海拔可分为落叶阔叶林带、针阔叶混交林带、针叶林带、高山灌丛草甸带等。在沟道内除松散固体物质外还有树木残枝,当泥石流暴发时沟道内

的树木残枝和泥石流固体物质一起向下运动;同时坡面土体起动导致坡面上的部分乔木也进入沟道成为泥石流中的漂木,并随泥石流进入下游区域。实地调查中在上游沟道中发现了胸径 60~70 cm 的乔木。

3.1.4 属暴雨型泥石流

参考附近安顺场、新乐站(西油房)和石棉县气象站资料。研究区所在的九龙县多年平均降雨量 1 215.9 mm,最大日降雨量 156.6 mm。全年降雨量主要集中在汛期,其中又以 7、8 月最多,分别占全年降雨量的 48.5% 和 52.8%,其最大日降雨量大于 110 mm,平均日最大雨量大于 84 mm,1 h 最大雨强大于 10 mm。本次泥石流暴发时正好处于该区域的汛期,这 3 个雨量站所在的地区海拔均低于研究区,考虑到山地降雨垂直递增的规律,降雨量随海拔的升高会相应的增加,因此该流域的最大降雨量和 1 h 最大雨强都比以上数字还要大一些。据调查,本次泥石流暴发前该流域从 7 月 12 日至 7 月 14 日连续 3 d 普降小雨,而在泥石流暴发前夜 7 月 15 日,该流域发生了局地强暴雨,从晚 8 时至 12 时该暴雨持续了近 4 h,此前该流域还发生了连续数日的前期降雨。随后该流域即暴发了大规模的泥石流,暴雨是本次泥石流的激发因素。

3.2 研究区植被特征

通过在 ERDAS 8.5 软件下对研究区植被情况进行的监督分类处理,得到研究区植被覆盖类型图(图 2)。图 2 显示出本区植被分布具有明显的垂直地带性规律,其植被分布类型具有川西山地植被垂直分布特点,从低海拔到高海拔依次为:流石滩植被、高山灌丛和草甸、亚高山针叶林、针阔叶混交林、落叶阔叶林。沟道两侧分布的主要植被从上游到下游分布是:高山灌丛和草甸、亚高山针叶林、针阔叶混交林、落叶阔叶林。

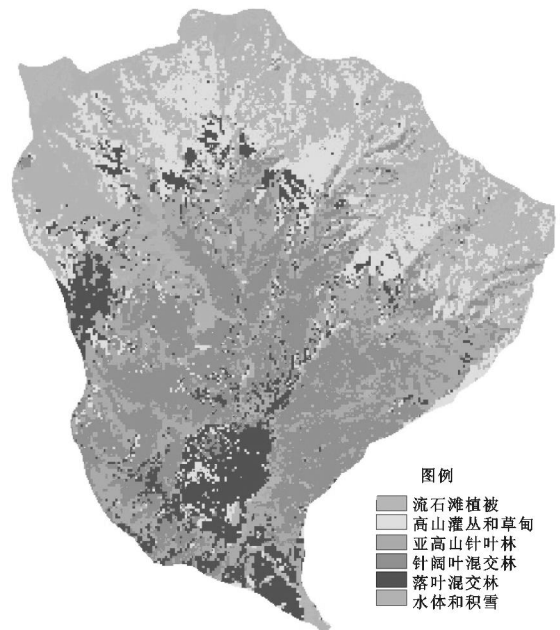


图 2 娃娃沟流域植被覆盖类型

通过统计得到每种植被类型所占百分比(图 3)。由于遥感数据为 4 月中下旬数据,因此在高海拔地区尚有较大面积

的积雪存在,主要集中在海拔 4 700 m 以上的区域。积雪和水体总面积 4.63 km²,占研究区总面积的 17.39%;4 月研究区的植被覆盖度高达 83%,森林覆盖度达 53%;其中针阔叶混交林面积最大,达 7.04 km²,占研究区总面积的 26.44%,主要分布在流域中下游区域,海拔 2 300~3 500 m 范围内;其次为高山灌丛和草甸,面积 4.28 km²,占研究区总面积的 16.06%,分布在海拔 3 800~4 500 m 的范围内;落叶阔叶林面积最小,为 2.79 km²,主要分布在主沟下游至沟口段。

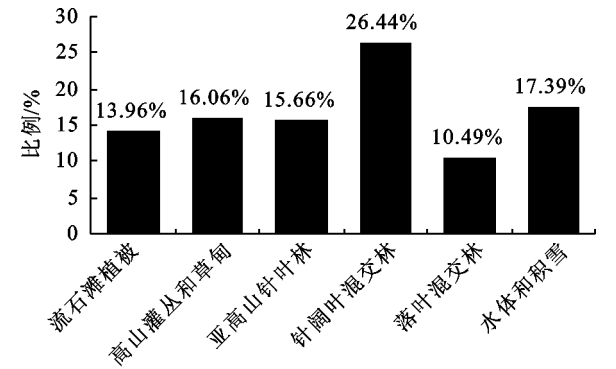


图 3 娃娃沟植被面积分类统计

3.3 研究区泥石流活动与植被关系

由前面对研究区本次泥石流活动特征和流域植被特征分析可以看出,本区域属植被覆盖良好的地区,但是依然暴发了规模较大的泥石流,证明植被不仅仅是单纯的抑制泥石流。以往的研究侧重于植被抑制泥石流活动方面,而涉及植被对泥石流活动其它方面的影响则较少。研究区的实际情况表明植被对泥石流的影响应包括抑制作用和增强作用两个方面。下面就这 2 个方面来分析娃娃沟泥石流活动与植被的关系。

3.3.1 研究区植被对泥石流活动的抑制作用

(1) 植被对泥石流活动有抑制作用,但是这种抑制作用是有限的。研究区 4 月的植被覆盖度已高达 83%,森林覆盖度达 53%,其中森林主要分布在流域中游和下游,由中上游至下游依次为针叶林、针阔混交林和阔叶林,植被覆盖良好。一方面,植被在控制泥石流固体物质补给方面发挥了作用。植被的根系具有固结表层土体的作用,对地表浅层滑坡也有一定的控制作用^[12];同时树干还能拦截部分坡面风化物,控制了松散固体物质在沟道的富集。另一方面,植被减小形成泥石流的水动力条件。植被冠层、树干和根系都有拦蓄降雨的作用,从而减小了洪水流量,同时也延缓了汇流时间。植被根、茎、叶生长情况的差异会导致对降雨的拦蓄作用有所不同。因而在植被良好地区通常不易暴发泥石流,研究区泥石流的低频性也再次验证了这一情况。

前人的研究表明植被能通过固结地表土体、削减径流、截阻泥沙、削减水动力条件等抑制泥石流的形成^[2,13-16]。由于植被的这一作用研究区泥石流暴发频率低,但一旦暴发泥石流其规模较大。然而植被对泥石流的抑制作用是有限的,良好的植被条件也不能避免泥石流的发生。在一定条件下植被能发挥积极因素控制泥石流的形成,可是当泥石流的形成因素(如降雨)超出植被的调控范围以后,植被将无技可

施,其控制作用也将丧失。正如研究区流域植被良好,但其较大规模泥石流的暴发证明植被对泥石流的抑制作用不是万能的。

(2) 不同植被类型对泥石流活动的控制作用是不同的。植被类型不同,其地上部分的根、茎、叶和地下部分的根系生长情况与形态是不同的,在发挥对泥石流活动的控制作用上也会有所差异。植被地上部分的枝叶越茂盛,叶面积越大,根系越发达其截流作用就越大,反之则越小。植被的根系如果扎根较深则控制地表土体的能力和抗倒伏能力较强,反之则较弱。最后,地表枯枝落叶层影响降雨对地表的溅蚀作用,若枯枝落叶较阔叶林中较少,地表裸露面积较大,雨滴对地表土体的溅蚀作用就较强。

本研究区内虽植被覆盖度高,但其植被类型主要为针阔叶混交林和针叶林。其枝叶不如阔叶林茂盛,叶面积较小,所以其对降雨的截留作用不及阔叶林,对泥石流的控制作用也相应较弱;针叶林中裸露地表面积较大,雨滴溅蚀作用较强烈,引起的表层土体流失较严重。

3.3.2 泥石流暴发后研究区植被对泥石流活动的增强作用

一方面,研究区地处川西南,受西南季风的影响,气候温暖湿润,较好的水热条件使得乔木的生长较快,根系植根较浅,当土体发生滑动时其抗滑能力较差。本次泥石流暴发前区内经历了连续 3 d 的降雨,表层土体充分饱和,乔木在后期强暴雨的激发下,容易在自重作用下失稳下滑,进入沟道。另一方面,研究区中、上游沟道两岸主要为针叶林和针阔混交林,针叶林对降雨的截流作用不及阔叶林;实地调查中在沟道中、上游发现沟岸两侧大量乔木滑入沟道就是例证。本次娃娃沟泥石流固体物质中的漂木即是沟道中的乔木加入泥石流活动的结果。此外,沟道两侧植被与失稳土体下滑是一个相互作用的过程。土体失稳带动根被下滑,同时,由于植物根系与土体盘根错节植被下滑将带动更多的土体进入沟道,在此种情况下植被反而增大了泥石流流量。同时高大乔木的加入使得泥石流堵塞沟道的可能性增加,成为泥石流的促进因素。

4 结 语

娃娃沟泥石流是高植被地区暴发泥石流的典型案例。通过对本区 TM 遥感影像的分析发现本区的植被情况良好(植被覆盖度>80%,森林覆盖度>50%),但是本区却暴发了百年一遇的大规模泥石流。娃娃沟泥石流说明植被对泥石流活动的抑制作用是有限的;大量乔木成为泥石流固体物质的一部分,反而加大了泥石流规模及其危害性;本区的植被类型以针叶林和针阔叶混交林为主,此种植被类型对泥石流活动的控制作用不及阔叶林。

由于人们通常认为植被能抑制泥石流活动,加之此类地区泥石流暴发频率往往较低,使得人们放松了对泥石流的防范意识,一旦泥石流暴发会带来更大损失。希望通过本文研究能引起更多研究人员对此类地区泥石流的重视,进行更深入的研究;使人们对植被与泥石流活动的关系有一个辩证的认识,提高警惕性,减少和避免此类灾害的再次发生。

(下转第 104 页)

SO_4^{2-} 。该地区盐离子的运移趋势以聚积为主,很少有淋洗脱盐过程,这与该地土壤质地,特殊的气候,如降水稀少、蒸发强烈等条件因子有密切的关系。

以 3 月及 5 月 0 - 20 cm 为例对盐离子进行相关性分析可知,土壤中的总可溶性盐与阴离子 Cl^- 及阳离子 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 之间具有很好的正相关关系。这一现象揭示了该地区土壤盐分主要与 Cl^- , $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量水平的高低有关。 CO_3^{2-} , HCO_3^- 与碱度之间具有很好的正相关关系。这表明了土壤的总碱度主要与其中弱酸根离子含量有关。

参考文献:

- [1] 俞仁培. 对盐渍土资源开发利用的思考[J]. 土壤通报, 2001, 32(专辑): 138-140.
- [2] 毛任钊, 田魁祥, 松本聪, 等. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系[J]. 土壤, 1997(6): 326-330.
- [3] 罗廷彬, 任崑, 李彦, 等. 咸水灌溉条件下干旱区盐渍土壤盐分变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(2): 166-170.
- [4] 鲍士旦. 土壤农化分析(3 版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [5] 余郭和. 灌区土壤盐渍化现状及改良, 防治措施建议[J]. 甘肃农业, 2004(11): 65-66.
- [6] 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所. 新疆土壤与改良利用[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1980: 166-170.
- [7] 新疆农业厅, 新疆土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 458-464.
- [8] 新疆于田县克里雅河流域规划总报告[R]. 新疆维吾尔自治区水利水电科学研究所, 1999: 7.
- [9] 牛博, 倪萍, 塔西铺拉提·特依拜. 遥感技术在盐渍化动态变化分析中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(4): 78-82.
- [10] 牛东玲, 彭红春, 王启基, 等. 柴达木盆地弃耕地盐渍状态的主分量分析[J]. 草业学报, 2001, 10(2): 39-46.
- [11] Huang D, Wang K, Wu W L. Dynamics of soil physical and chemical properties and vegetation succession characteristics during grassland desertification under sheep grazing in an agro-pastoral transition zone in Northern China[J]. Journal of Arid Environment, 2007, 70: 120-136.
- [12] Applied geography. Irrigation expansion and dynamics of desertification in the Circum-Aral region of central Asia. 2000, 20: 349-367.
- [13] 海米提·依米提. 塔里木盆地绿洲水资源利用与环境可持续发展研究[D]. 北京: 中国科学院, .
- [14] 姚春霞, 陈振楼, 许世远. 上海市郊保护地土壤盐分研究[J]. 环境科学, 2007, (6): 1373-1376.
- [15] 余海英, 李延轩, 周建民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 571-576.

(上接第 99 页)

致谢: 本次研究的实验数据由中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室土力学专业实验室提供, 同时土力学实验室的多位老师在数据处理方面给予了大力支持和帮助, 在此一并致以深切的谢意。

参考文献:

- [1] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989: 64-67.
- [2] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测与研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 243-244.
- [3] 张有富. 蒋家沟流域的森林植被与泥石流[J]. 山地学报, 1987, 5(4): 213-217.
- [4] 李树德, 岳升阳, 徐海鹏. 森林植被与泥石流活动[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2): 30-31.
- [5] 谢洪, 韦方强, 李泳, 等. 1999 年委内瑞拉阿维拉山北坡入海型泥石流[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 117-122.
- [6] 马东涛, 冯自立, 张金山, 等. 7. 19 云南腾冲滑坡泥石流灾害调查报告[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6): 67-71.
- [7] 马东涛, 张金山, 冯自立, 等. 2004. 7. 20 云南盈江滑坡泥石流山洪灾害成因及减灾对策[J]. 灾害学, 2005, 20(1): 67-71.
- [8] 高克昌, 孟国才, 韦方强, 等. 德宏“7. 5”特大滑坡泥石流灾害分析及其对策[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(3): 251-257.
- [9] 陈宁生, 崔鹏, 刘中港, 等. 基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算[J]. 中国科学(E 辑): 技术科学, 2003(46): 163-174.
- [10] 何杰, 陈宁生. 粘性泥石流弯道超高在流速计算中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(4): 425-428.
- [11] 陈晓清, 崔鹏, 韦方强. 良好植被区泥石流防治初探[J]. 山地学报, 2006, 24(3): 333-339.
- [12] 崔鹏, 柳素清, 唐邦兴, 等. 风景区泥石流研究与防治[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 9-10.
- [13] 孙吉定, 张金香, 王振亮, 等. 河北太行山区“96. 8”暴雨泥石流灾害考察报告[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(3): 104-110.
- [14] 顾俊周. 改变滇东北生态环境关键在森林植被的恢复[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 187-189.
- [15] 吕态能. 东川严重水土流失区植被恢复对策[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 134-137.
- [16] 李改堂. 森林植被在涉县 96. 8 特大洪灾中抗洪减灾作用的调查报告[J]. 河北林业科技, 1997(3): 34-36, 38.