

贡嘎山峨眉冷杉林原生扰动土壤溶质运移的持续降雨模拟研究

王为东, 单保庆, 尹澄清

(中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:以人工持续(5d)降雨模拟方式研究了贡嘎山峨眉冷杉林原生土壤地表覆被层破坏后土壤中矿质元素与营养盐的迁移输出动态与规律。模拟降雨采用当地最为常见的小到中雨雨型(5.7~26mm/h)。壤中流以垂直入渗为主,并滞后于降雨 0.2~4.2h。通过模拟实验发现,降雨总量和降雨事件的持续时间对壤中流产生量的影响比单位时间降雨强度的影响更为明显。在持续降雨影响下,主要离子(Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} 和 $Na^{+}+K^{+}$)和营养盐($NH_4^{+}-N$, $NO_3^{-}-N$ 和活性磷酸盐)在短期内急剧流失。模拟降雨的第 1 天,壤中流结束时离子浓度仅为初始时浓度的 29%,营养盐浓度为初始浓度的 21%~55%。至第 3 天,上述离子和营养盐输出浓度趋于恒定,约为首日降雨壤中流初始浓度的 1%~15%。在主要矿质元素流失后,原生土壤内过程转为有机质控制的 HCO_3^{-} 输出过程。伴随着土壤矿质养分的输出,土壤缓冲能力下降。壤中流 pH 值由 6.1 降为 5.2。研究结果表明,贡嘎山区峨眉冷杉林原生土壤系统十分脆弱,养分易于流失,对人类活动的敏感性很高。

关键词:贡嘎山; 峨眉冷杉林; 降雨模拟; 壤中流; 溶质运移

A Continuous Rainfall Simulation on the Solute Movement Through the Disturbed Primary Soil of an *Abies fabri* Forest in Gongga Mountain, China

WANG Wei-Dong, SHAN Bao-Qing, YIN Cheng-Qing (SKLEAC, Research Center for Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2154~2162.

Abstract: The Gongga Mountain, located on the southeastern fringe of the Qinghai-Tibet Plateau, is vulnerable and sensitive to climatic change. The fragility of mountain forest ecosystems in this region is mainly resulted from steep slopes, thinness of soil layer and un-harmony among the hydro-thermal factors. The surface cover of primary forest has been highly disturbed by human activities, such as tourism and deforestation. The objective of this study was to study the occurrence of subsurface runoff and the movement of mineral elements through the disturbed primary soil by an indoor rainfall simulation. The disturbance was simulated by removal of vegetation, moss and debris.

The soil was collected from the slope wash in the deglaciation slash of the subalpine dark coniferous forest zone, in which *Abies fabri* forest community reaches climax. The soil is loose and porous with high infiltration and categorized as subalpine dark brown forest soil. Four columns were packed with soil sampled from the corresponding horizons to a similar bulk density. From the top down, there are 4 layers; A0, 4cm, vegetation, moss and debris were removed and replaced by washed and calcined quartz sand; A horizon, 18 cm, soil; B horizon, 20cm, soil; C horizon, 8cm, filled with gravel of diameter 3~8cm. Three columns were set as treatments by precipitation of simulated rainfall and one for control by distilled water. The subsurface runoff collection holes were drilled at the both sides of corresponding horizons. Before rainfall start, four columns were gradually wetted to the stable water capacity (20%) with simulated rainfall. Small-moderate rain intensity (5.7~26 mm/h), which is common in the experimental region

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(项目编号 39930130)

收稿日期: 2002-10-08

作者简介: 王为东(1973~), 男, 山东荣成人, 博士。主要从事水生态学与天然水质学研究。

during May-June, was adopted with 5 days of duration. Once the subsurface runoff began, the runoff was sampled every certain interval and the main ions and nutrients in the runoff were analyzed.

No significances exist between the runoff output behaviors of treatments and control column. Under the influence of small-moderate rain intensity, the runoff mode in the *Abies fabri* primary soil was dominated by subsurface runoff. It mainly flowed from C horizon with a time lag of 0.2~4.2 h after the rainfall start. After the rainfall stopped, the subsurface runoff continued to leach from soil and showed "tailing" phenomenon. The results suggest that the subsurface runoff output chiefly depends on the total rainfall amount and duration, not significantly correlated to the rainfall intensity. With the rainfall duration, the output rates of subsurface runoff increased. Under the influence of continuous rainfall, the main ions (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} and $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) and nutrients ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and total reactive phosphorus) quickly lost from the disturbed primary soil. The main ions show different preferential migration sequence in different soil columns. The HCO_3^- concentrations in the runoff fluctuate more widely and increasingly output from the primary soil with rainfall duration. On the 1st day of rainfall simulation, the concentrations of main ions at the end of flow were about 29% of those of the beginning period, and the nutrient concentrations accounted for 21%~55% of the initial. On the 3rd day, the output concentrations of ions and nutrients are only 1%~15% of the initial concentrations. After large quantity losses of mineral ions, the dominated anions in the subsurface runoff turned from SO_4^{2-} to HCO_3^- . The above results suggest that the subsurface processes in the disturbed primary soil mainly depend on the carbon cycle controlled by organic matter (humus). Affected by the continuous rainfall, the mineral elements and nutrients largely run off, the soil buffering capacity decreased dramatically and the pH value of subsurface runoff declined sharply from 6.1 to 5.2. The results show that the primary soil of *Abies fabri* forests in Gongga Mountain is a weak and sensitive system to anthropogenic disturbance. The common small-moderate rainfall distribution strongly affects the transport and output of main mineral elements. The element losses caused by surface vegetation destruction can be achieved within a short period.

Key words: Gongga Mountain; *Abies fabri* forest; rainfall simulation; subsurface runoff; solute movement

文章编号:1000-0933(2002)12-2154-09 中图分类号:S715.P342 文献标识码:A

江河上游水源区森林系统的水文动态和生物地球化学过程直接影响着下游水体的水环境质量。长江上游森林生态系统多为原始林,林下土壤系统受区域气候的影响,发育程度低,土壤薄而层次少,对人类活动带来的扰动十分敏感^[1]。土壤系统一旦受到破坏,水文过程将发生显著变化,原有土壤组分的生物地球化学过程随之而变,导致整个系统的生态过程及演化发生质的变化^[2]。敏感上游区森林生态系统土壤在扰动后的生物地球化学过程和特点值得关注和研究。

贡嘎山区位于青藏高原东南缘与四川盆地过渡区,地形起伏大,且分布有我国海拔最低的海洋性冰川。由于其分布海拔较高,气候变化较平原地区更敏感,对长江上游水源的稳定以及江河中下游生态环境有重要影响。从20世纪90年代以来,以中国科学院贡嘎山高山定位站为野外监测点,对长江上游水源区森林水文机制进行了系统的研究,得出了一系列结果^[3,4]。但是,由于森林生态系统中土壤与水质之间的关系复杂,水化学元素和营养物质在土壤过程中的野外实测和量化研究比较困难,有关该区域的森林系统养分与水化学元素的土壤迁移过程研究很少。贡嘎山地区降水丰富,流水坡面侵蚀和沟蚀作用十分强烈,泥石流活动、旅游开发以及当地农民滥砍滥伐等,致使森林生态系统地表覆被层遭受破坏,林下地面覆盖层滞留水分作用差。考虑到该区域的敏感性及其对长江水环境质量保护的重要性,于2001年4月,以贡嘎山峨眉冷杉林原生扰动土壤为研究对象,采用当地5~6月份最为常见的小到中雨雨型,通过室内人工降雨模拟方式,研究坡积物发育土壤的壤中流过程和扰动情况下土壤主要水化学离子和营养元素的迁移输出行为。通过研究主要矿质养分元素在土壤层中的迁移特点,揭示贡嘎山区亚高山冷杉林-暗棕壤系统中的壤中流水分动态和溶质迁移输出规律。

1 研究方法

1.1 区域及供试土壤特征

贡嘎山试验站位于贡嘎山东坡海拔 3000m 的冰碛台地(海螺沟左岸)上,为泥石流堆积形成的扇形泥石流迹地,这里原始森林演替梯度较好,其中峨嵋冷杉林是贡嘎山东坡亚高山寒温带针叶林带的主体^[3,4]。林下土壤为原生土壤类型,土层发育程度低且较薄,土壤渗透力强,水文过程以壤中流为主。

该区域气候冷湿,属山地寒温带气候类型。据海拔 3000m 气象资料,年降水在 1800~2100mm,多年平均降水 1940mm。汛期(5~10 月份)以降雨为主(占 70%),旱季(11~4 月份)主要是降雪。本区雨量大,雨日多,但雨强并不大,日雨量很少超过 40mm,多是在十几毫米左右^[3,5]。

室内模拟所用土壤取自贡嘎山高山水文观测系统黄崩溜沟流域的二级支沟马道沟(集水面积 0.407km²)上。马道沟之上是典型的坡积物上发育成的森林,流域内森林灌草丛非常茂密,植被类型为冷杉-杜鹃、箭竹-苔藓相间。地下土壤疏松而厚,透水性极强,土壤属亚高山冷杉林暗棕壤,发育母质为云母片岩的坡积物及冰碛物。本文采用野外多点式取样法,采集实验用土,在分层的基础上,对各点土壤进行混匀,备用,其中破坏后的地表覆被层(A0 层)用石英砂层代替。实验土壤基本性质见表 1。

表 1 降雨前模拟土柱基本性质

Table 1 The basic soil properties for rainfall simulation

土层 Soil horizon	pH	容重(g/cm ³) Bulk density	孔隙度(%) Porosity	有机质(%) Organic matter	全氮(%) Total nitrogen	全磷(%) Total phosphorus
A	5.17	1.02	38.4	18.9	0.514	0.17
B	5.30	1.12	32.3	4.5	0.194	0.12

1.2 降雨模拟过程

基于质量平衡理论,通过实验土柱入渗和实时周期性监控的方法来进行室内降雨模拟实验。模拟土柱分为四层(图 1)。表层为石英砂层(模拟地表覆被层,平均厚度在 3~5cm 之间^[3])A₀,层厚 4cm,石英砂层持水量约为 46%(W/W)。土层 A,总厚度 18cm,又分为 2 层,每层 9cm。土层 B,总厚度 20cm,又分为 2 层,每层 10cm。母质层 C,厚度为 8cm,以砾石(直径约 3~8cm)组成。土层 A+B 共计 38cm,基本符合当地成熟林下土壤厚度特征^[3,4]。土柱填充后各层容重(表 1)与当地林下土壤相应土层容重(野外实测)接近。实验土柱共为 4 个,其中 3 个模拟当地天然降水成分(表 2),1 个用蒸馏水入渗,作为空白对照。

表 2 模拟降水主要化学成分(mg/L)

Table 2 The chemical composition of simulated rainfall

pH	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	∑C _i
6.69	0.68	0.88	2.07	1.18	2.84	6.71	1.44	0.075	0.003	15.9

* ∑C_i 为主要离子总量;降水的水化学类型为 C_i^{Na},符合当地天然降雨与林下水化学类型。∑C_i signifies the total ion contents. The hydrochemical type of simulated rainfall is C_i^{Na}, fitting with those of local rainfall and throughfall

盛土容器用 PVC 管制作,直径为 15cm,高为 50cm。容器为半圆封合型,封隙可打开。外用宽塑胶带封合。依据土层,容器壁上开 1cm 圆孔,用导管收集渗流。土层之间置塑料薄网,利于导管放置。导管外流水用 250ml 塑料瓶收集。为了防止容器壁与土壤之间的促流作用,将表层贴近容器壁之间的封隙用硅胶弥合,宽度为 0.5cm。

当地成熟林土壤稳定持水量(除去生物含水)通常为 20%^[3]。实验前通过补充液入渗,使土壤达到此水分含量。每个柱子应加入补充液(配制方法参照当地降雨成分)1.25L,注入时间 48h,每个小时 26ml,每隔 8h 加 1 次(共加 6 次),每次 210ml。

人工降雨装置采用中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家实验室设计的人工降雨模拟装置^[6]。考虑到当地森林林冠叶面截留作用,林下雨水滴落速率得以缓冲,以及室内模拟大规模降雨的难度,本研究采用的室内人工降雨高度为 2.5m。黄崩溜沟流域雨量大,雨日多,但雨强并不大,大多数在十几毫米左右^[3]。本实验以历年 6 月上中旬强度为准,雨型为小到中雨型,连续降雨 5d,每天降雨历时不等,随机设计。第 1 天至第 5 天每天单位时间降雨强度和降雨持续时数分别为 3.7mm/h,5.2h;7.2mm/h,2.9h;11mm/h,1h;11.5h;11.6mm/h,2.25h。

在降雨模拟过程中进行水流动态监控,通常按 10min 记录 1 次(开始时可视情况而定),给出时间过程

线。由于有时壤中流的生成呈脉冲式,将数据换算成单位时间段的平均值,便于相互比较。

分层分析供试土壤 pH、容重、有机质、全氮、全磷等理化参数;分析方法为土壤化学常规分析方法^[7]。

土柱壤中流分析内容主要有 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、氨态氮、硝态氮、活性磷酸盐,用常规标准方法进行^[8]。 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 用差减法求得^[9]。模拟降水与壤中流水化学类型按阿列金分类法进行划分^[9]。

2 结果与分析

2.1 壤中流发生规律

本次实验模拟了小到中雨强度下贡嘎山地区原生土壤地表覆被层破坏后的壤中流过程。结果表明,在此种雨型影响下,供试土壤径流模式以土壤内部壤中流为主,流动过程具有“滞后”和“拖尾”现象。壤中流的输出量主要受降雨总量和降雨历时长短的影响,而与单位时间降雨强度相关性不显著。随降雨周期的延长,壤中流输出频率加快(见图 2)。

室内模拟实验证明了贡嘎山原生扰动土壤具有高渗透性,壤中流以垂直入渗为主,较少发生侧向入渗。除第一次降雨中有少许壤中流产生自 A_0 与 B 层,壤中流均产生自土壤的 C 层。马道沟流域 A_0 层为半分解枯枝落叶, A 与 B 土壤层上部有根系层结构,疏松多孔,孔隙度为 32%~38%,导水能力很强。C 层由砂砾结构组成,其中含有很多连续管状孔隙,有利于壤中流的快速导出。在整个降雨过程中壤中流的输出呈脉冲式进行,但总的说来,在降雨强度恒定的情况下,出流较为平缓,壤中流累积输出量大致呈线性上升。在连续降雨的前 4 天,壤中流输出量与单位时间雨强的关系并不明显,但壤中流产生总量随日降雨量增加而增加。这说明降雨总量以及降雨持续时间对壤中流产生量的影响较降雨强度的影响更为明显。

从图 2 中也可看出,在降雨的第 5 天,壤中流产生速率较前四天显著加快,这除与该日单位时间降雨强度较大有关外,也说明连续降雨 4d 后,土壤持水能力下降,土柱中可持留水量仅占降雨总量的 15%,这远低于首次降雨土柱持水量,56%。不同降雨事件中,壤中流的始流时间差别显著,并均表现出“滞后现象”。其中第 1 天壤中流始流发生在降雨开始后 4.27h,第 2 天发生在 0.52h,第 3 天至第 5 天壤中流始流时间基本一致,在 0.2~0.3h。在单位降雨强度较小的第 1、第 2 与第 4 次降雨结束后,壤中流输出具有“拖尾现象”,在第一次降雨中拖尾时长竟达 50min 之久。壤中流输出具有“滞后现象”和“拖尾现象”,这是森林土壤的调水效益。由于贡嘎山地区潮湿多雨,降雨中离子成分含量较低,在本文的模拟实验中以蒸馏水入渗的对照组壤中流迁移输出行为(累积输出量、壤中流中主要离子和营养盐浓度等)与降雨组没有显著差别。

贡嘎山地区河川径流主要由壤中流和地下径流补给。黄崩溜沟流域河流来水量的 40% 来自冰川的超量消融,其余为降水,季节性融雪和地下水补给^[3]。在当地特殊的小到中雨地域雨型影响下,再加森林地表覆被物和含砂石土壤极强的透水性,不可能发生地表漫流和超渗产流,水分在林下土壤中运动以亚表层壤中流和地下径流过程为主。本次室内模拟实验较好地揭示了当地林下土壤壤中流发生规律,也充分反映了较短周期内持续降雨对原生林下扰动土壤的剧烈影响。

壤中流始流的“滞后现象”与降雨停止后的“拖尾现象”表明,虽然在降雨模拟开始前进行了土壤水分的饱和和补偿,由于森林下土壤持水力特别强,在降雨强度较小情况下,森林土壤具有很强的蓄水能力,可以保持高度湿润状态。贡嘎山林下覆有丰富的活藓类及枯枝落叶死地被物,它们具有很大持水性能,可

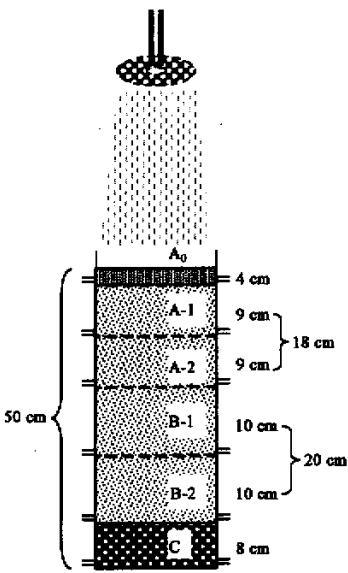


图 1 实验装置示意图(A_0 、A、B、C 表示土壤层次)
Fig.1 The sketch map for the experimental apparatus
(A_0 、A、B、C signify soil horizon.)

大量吸水,最大持水量:活藓类约 1700%,死地被物约 600%,从而使土壤剖面出于过湿的环境^[10]。贡嘎山地区森林改善了地表界面的入渗性能,森林的腐殖质、根系层对水分有很好的调蓄作用^[5]。因此森林除具有很强的贮水能力外,对径流成分也有较大调节作用,表现为地面径流和壤中流比例减少,地下径流比例增加,致使出流过程延缓。在贡嘎山地区,小到中雨为常见雨型,上述实验现象是此雨型影响下森林土壤特性的反映。在降雨暂停后,保持在土壤中的水份可部分释出,继续补充地下径流。

2.2 壤中流 pH 值变化

土壤缓冲能力的大小决定于土壤中可释放的阳离子总量的大小。一般情况下,土壤中可交换的阳离子总量越多,土壤抗拒外界氢离子输入能力就越强,土壤缓冲能力也就越强^[11]。贡嘎山森林土壤未受到酸沉降侵蚀,其土壤缓冲区域宽,土壤中可交换的阳离子总量高,且缓冲能力主要表现在以阳离子交换(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)缓冲为主,故土壤缓冲能力强,冷杉生长良好^[11]。在降雨模拟过程中,第 2 天至第 4 天,土壤壤中流 pH 值变动不大,但到了第 5 天,由于土壤中主要阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)淋失殆尽,缓冲能力下降,土壤中氢离子大量析出,因此 pH 值发生显著下降,为 5.26(图 3)。在 4 次降雨过程中,蒸馏水组 pH 值均较降雨组高,这应是由蒸馏水和模拟降雨 pH 值的差异引起的。模拟降雨 pH 值为 6.69,接近当地林下水 pH 值,而蒸馏水 pH 值为 7 左右,因此当经过土壤后,这种差异效应仍旧存在。另外,由于林下地表覆被物发达,在长期的降雨淋溶过程中腐殖质化,产生大量的腐植酸,使得土壤呈酸性。在森林土壤的影响下,模拟降雨及蒸馏水经过模拟土柱后,pH 值发生了显著下降。

同一降雨过程中,随着降雨时间延长,壤中流 pH 值基本呈下降趋势,但有波动性特征,表明高有机质含量的土壤,其析出过程具有一定的时滞反映,特别是在壤中流产生的初始和终了阶段,pH 值比较高。

2.3 壤中流中主要化学离子迁移输出规律

在连续降雨过程中,土壤壤中流中主要化学离子的迁移输出表现出较为一致的规律,主要化学离子如 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ + K^+ 等的浓度随降雨历时延长逐渐下降(见图 4a~图 4f)。在降雨模拟的第 1 天,壤中流始流中主要化学离子浓度很高,部分离子浓度高于黄崩溜沟流域溪流水中相应离子浓度(野外监测)。随着时间的推移,离子浓度迅速地呈线性下降,壤中流流动结束时的数据仅为初始浓度的 29%。在降雨模拟的第 2 天,上述诸离子的浓度仍然呈下降趋势,

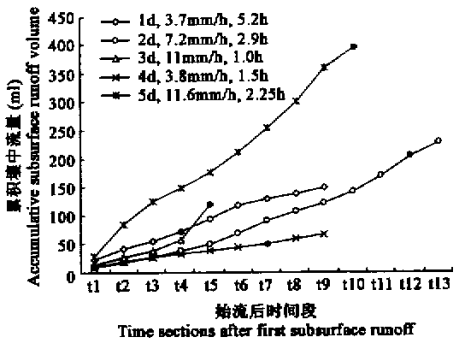


图 2 五次降雨过程中累积壤中流体积的变化
Fig. 2 The accumulative subsurface runoff volume during the five rainfall events
t1~t13 指径流开始后的时间段,t1 为 0~10min,t2 为 10~20min,...,余者类推。由于始流时间不一样,所以不同土柱在单位时间(130min)内的时间段数也不一样,图中累积渗流量均指 C 层渗出的壤中流,数值为三平行土柱均值。实心圆点处表示降雨停止。t1~t13 are the time sections after first subsurface runoff began;t1 is 0~10min,t2 is 10~20min,... Because the first subsurface runoff began at a different time, the number of time sections for different soil column varied. The accumulative runoff is the mean of triplicates and all refers to the subsurface runoff effusing from C horizon. The solid circles signify the time rainfall stopped

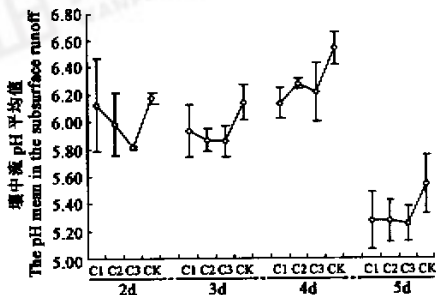


图 3 4 次降雨过程中不同土柱壤中流 pH 平均值
Fig. 3 The average pH values in the subsurface runoff from different soil columns during 4 simulated rainfall events
* C1 至 C3 为模拟降雨平行组,CK 为蒸馏水入渗对照组。C1-C3 are replicates infiltrated by simulated rainfall, and CK denotes control group infiltrated by distilled water.

且速度较快。结果表明,如果贡嘎山森林土壤表层破坏,土壤矿质元素输出非常大。但自第3天开始, SO_4^{2-} 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 等几乎降为0,其余离子浓度波动幅度较小,趋于恒定,约为第1天降雨过程壤中流初始浓度的1%~15%。原生土壤地被层被破坏,养分离子极易流失。表层植被被破坏引起的土壤结构和养分的流失的时间在短时间内就可完成,而且难以恢复。其它的相关性研究,也发现了这种现象,如钟祥浩和罗辑^[12]发现青藏高原东缘横断山区山地暗针叶林带原始冷、云杉林生态系统一旦受到破坏,在自然条件下,恢复到最佳结构与功能状态,需要很长的时间。对贡嘎山峨眉冷杉林分布带来说,起码要100a以上^[12],这同该区域土壤系统极端脆弱不无关系。

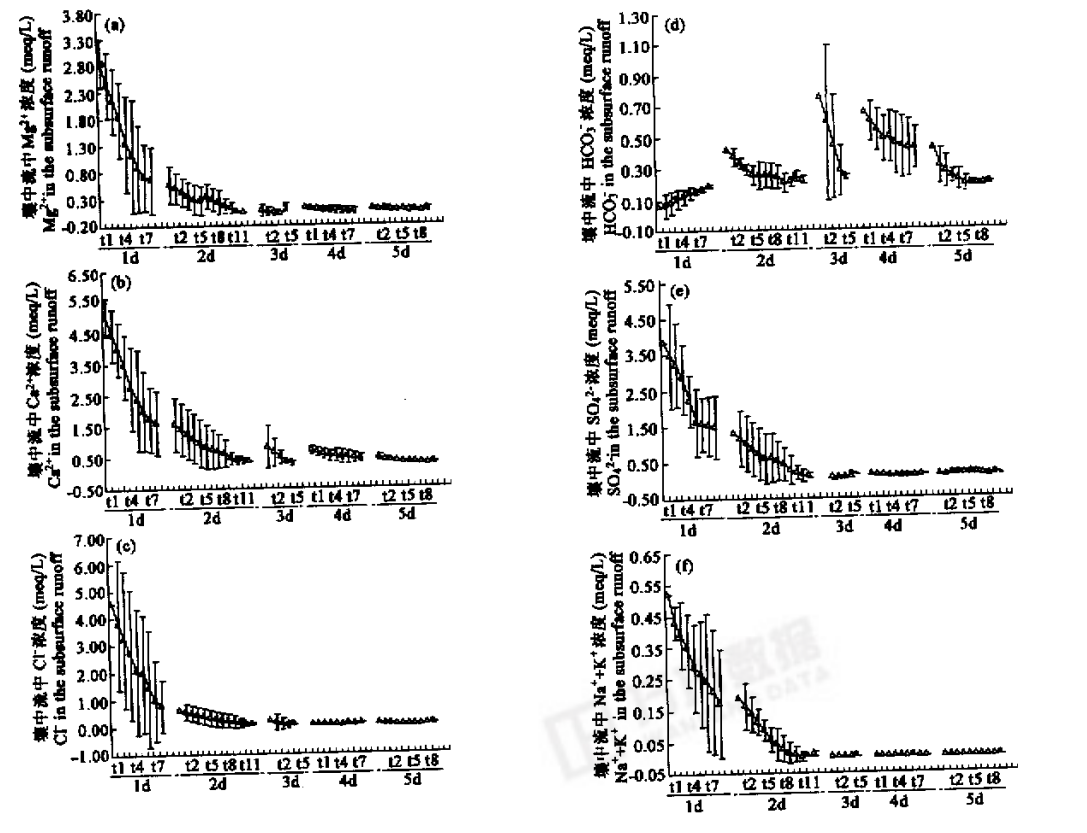


图 4 5次降雨实验壤中流中离子浓度随降雨时间段的变化

Fig. 4 The ion concentrations in the subsurface runoff with rainfall time sections during 5 rainfall events * 浓度值为三土柱平均值,实心圆点处表示停止降雨。t1~ti 指径流开始后的时间段,t1:0~10min,t2:10~20min, ..., 余者类推。The concentrations are the average of three parallel soil columns. The solid circles signify where rainfall stopped. t1~ti; the time sections after first subsurface runoff began, t1:0~10min, t2:10~20min, ..., the rest can be analogized

相对其它水化学离子,壤中流中 HCO_3^- 的浓度波动幅度较大,但绝对值较小(图 4d)。在降雨的第一天, HCO_3^- 浓度呈逐步上升的趋势。在随后的历次降雨过程中,随降雨历时的延长, HCO_3^- 浓度逐步下降。另外,我们注意到,其它离子在降雨过程中迅速迁移输出并消耗殆尽,而 HCO_3^- 却具有不断输出现象。这种现象的产生同土壤各层有机质含量都比较高有关。马道沟流域近熟林土壤类型属于山地棕色暗针叶林土,土壤有机碳储量为 $143.152\text{t}/\text{hm}^2$,土壤 A、B、C 层分别占总储量 82.46%、11.42% 和 11.42%^[13]。土壤内部

有机质循环能有效影响或控制养分物质向溪流水的输出^[14]。关于有机质主导型的溪水生物地球化学过程对氮元素迁移流动效应的研究已很多,但来自原生矿物的元素通过表层土壤过程对溪水的强烈化学影响,以前却没有发现^[14]。由本实验推断,在降雨作用下,冷杉林原生土壤内大部分矿质元素会迅速迁移流失,经过短时间就会趋向恒定,然后土壤内过程-壤中流组分变化开始由有机质(腐殖质)控制的碳循环决定。

一般而言,土壤系统受到外界环境影响极易产生优势流现象^[15,16]。冻融和干湿交替均可使土壤产生大孔隙和优势流^[17]。另外土壤的内部结构也会产生优势流现象^[18,19]。模拟实验初始阶段,主要化学离子在不同土柱之间变动幅度很大,这主要是由于土壤溶质优先迁移所致。虽然在填充土柱时基本保证填充条件的一致性,但土壤内部的微小差异仍然造成了不同的优先迁移介质,不同化学离子在不同土柱之间的优先迁移顺序和迁移量也相对存在差别。如氯离子在第2天即较为平缓(图4c),这同氯离子不易被土壤颗粒吸附、迁移相对容易^[20,21]有关。

同壤中流输出量相似,在降雨结束后,离子输出也存在“拖尾现象”,其输出过程同降雨过程同步。这同冷杉林土壤系统的滞水、含水能力有关,原生土壤内部常吸附有一定比例的不流动水,这部分水在降雨结束后可部分释出,从而使离子输出发生“拖尾”现象。

从图5中可以看出,壤中流中累积输出量顺序是: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$,随降雨时间的延长,累积输出速率趋于平缓。但是 HCO_3^- 的累积输出波动幅度变化最大,初始输出量很小,随后呈跃动式上升。由于离子输出速率差别极大,在降雨过程中,壤中流中主要离子成分比例关系发生了显著的变化。贡嘎山虽然地处寒温带冷湿地区,但降雨中主要离子成分与其它地区并无太大差异。人工标配模拟降水的水化学类型为 C_1^{Na} ,符合当地天然降雨与林下水化学类型。然而在当地特有的冰碛物和坡积物发育母质作用下,雨水经过土壤过程后,离子成分发生显著变化。首次降雨中,壤中流水化学类型均为 $\text{S}_{\text{III}}^{\text{Ca}}$ 型,到了第2天,即基本上全部转为 $\text{C}_{\text{III}}^{\text{Na}}$ 型。当地溪流水主要为硫酸盐类水,然而在室内降雨模拟中,优势离子 SO_4^{2-} 迅速流失,土壤溶质输出过程变为由有机质循环控制的 HCO_3^- 输出过程为主,这是当地特有的峨眉冷杉林下土壤特性的反映。

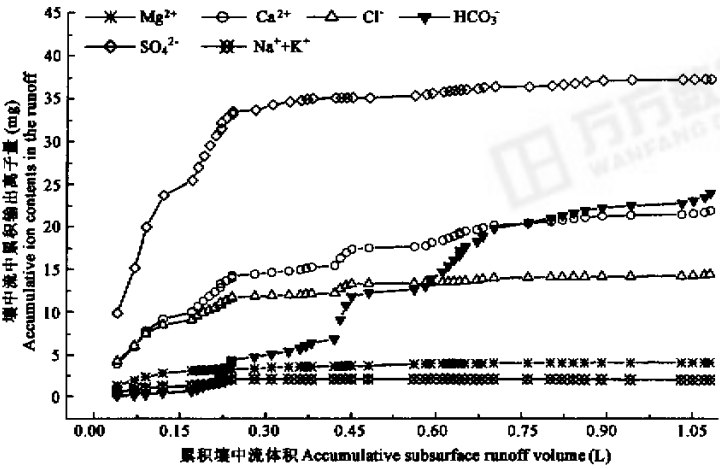


图5 壤中流中累积离子输出量随壤中流体积的变化

Fig. 5 The accumulative ion contents in the subsurface runoff with accumulative runoff volume

由于室内降雨模拟实验用的是风干土,有机质和腐殖质已有部分分解,含量相对下降,表层土壤有机质含量只有1.8%~2.0%,实际上贡嘎山剖面A1层原位土壤有机质含量可高达40%~60%(远大于30%)^[10]。有机酸的络合淋溶与淀积作用被认为是土壤主要过程。贡嘎山林下土壤表层普遍覆盖3~10cm厚的枯枝

落叶及苔藓地被物,并含有大量的真菌菌丝体,在以真菌为主的微生物作用下,进行着特殊的腐殖化过程。腐殖质组成中以富里酸占优势,富里酸呈强酸性,具有较高的代换容量,对土壤矿物质有强烈的破坏作用。由于贡嘎山森林土壤表层不发育,又处于一种过湿环境,加上气温低下,土壤中微生物(以真菌为主)活动受抑制,表层大量枯枝落叶及有机质的分解缓慢,因此暗针叶林下土层中,富里酸、胡敏酸还是不完全分解的腐殖质产物。这样的腐殖质上面络(螯)合有大量交换性阳离子,在降雨条件下,这些离子便不断析出,通过壤中流输出。

2.4 壤中流中营养盐输出动态

本次实验选取了 3 场雨,测定土壤-径流过程中的氨态氮、硝态氮和活性磷酸盐的浓度变化过程,结果如图 6a~c 所示。

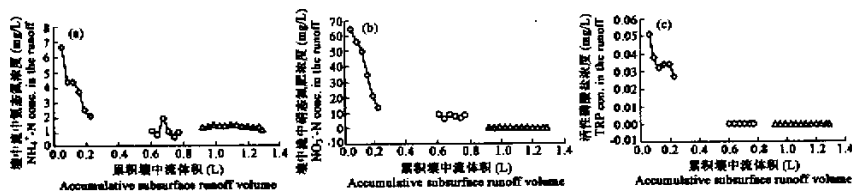


图 6 第 1、第 3、第 5 次降雨过程壤中流中营养盐浓度随累积壤中流体积的变化(正方形、圆形和三角形分别表示第 1、第 3 和第 5 天降雨过程)

Fig. 6 The nutrient concentrations in the subsurface runoff with accumulative runoff volume for the first, third and fifth rainfall events (Square, circle and triangle denote the first, third and fifth rainfall events, respectively. TRP in (c) signifies total reactive phosphorus)

在壤中流产生的初始阶段,营养盐浓度很高,氨态氮、硝态氮和活性磷酸盐浓度分别达到了 6.5, 64, 0.05mg/L。降雨使得林下土壤氮磷等营养物质急剧流失,且在较短时间内就能完成。从模拟情况来看,在持续降雨的第 1 天(雨强 3.7mm/h),壤中流中氨氮、硝态氮和活性磷酸盐的浓度值发生显著下降,降雨始末浓度比差分别为 1.8~4.7。在第 3 天(雨强 11mm/h),氨态氮和硝态氮略有波动,但浓度值显著低于第 1 天壤中流中的迁移浓度值,第 5 天(雨强 11.6mm/h),二者的浓度值则趋向恒定,活性磷酸盐浓度值在第 3 天已降为 0。由于本文采取的模拟降雨强度是贡嘎山冷杉林区最为常见的小到中雨类型,因而可以推断出,在这种雨型分布下,亚高山冷杉林原生土壤在扰动后,土壤养分过程会产生剧烈的变化。以氮、磷为代表的营养盐物质在较短的时间内就会大量流失,进一步说明了原生森林土壤系统的脆弱性和对人类活动的敏感性。鉴于贡嘎山亚高山冷杉林系统地理位置的敏感性(位于长江上游,是主要水源区之一),减少或控制土壤扰动,对长江中下游水体质量,将会十分关键。但本次模拟仅限于室内,尚需进一步野外实测与求证方面的后续研究。

3 结论

以人工降雨模拟方式研究了贡嘎山峨眉冷杉林原生土壤地表覆被层破坏后壤中流的发生规律及溶质要素迁移行为,主要结论如下:

- (1)通过室内长时间降雨模拟证实,贡嘎山冷杉林原生土壤在小到中雨雨型影响下,径流模式以土壤内部壤中流为主。壤中流发生滞后于降雨 0.2~4.2h,以垂直入渗过程为主。降雨停止后壤中流输出表现出“拖尾”现象。壤中流的输出量主要受降雨总量和降雨历时长短的影响,而与单位时间降雨强度相关不显著。随降雨周期的延长,壤中流输出频率加快。
- (2)持续降雨显著影响着土壤中溶质元素的迁移输出。在连续降雨的 1~2d, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 $Na^{+}+K^{+}$ 大量流失,在不同土柱间表现出不同的优先迁移顺序。壤中流中 HCO_3^{-} 浓度波动幅度较大,具有不断输出现象。
- (3)壤中流溶质输出量顺序是: $SO_4^{2-} > Ca^{2+} > Cl^{-} > Mg^{2+} > Na^{+}+K^{+}$,这与流域溪流水中离子关系相应。 HCO_3^{-} 的累积输出量波动幅度较大,初始累积输出量很小,随后呈跳跃式上升。

(4)在壤中流输出过程中水化学类型由 $S_{\text{HCO}_3^-}$ 变为 $C_{\text{HCO}_3^-}$, 土壤亚表层过程主要由有机质(腐殖质)控制的碳循环决定。

(5)在模拟降雨的第 1 天, 土壤中主要无机营养盐 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 迅速输出, 降雨始末浓度比值为 1.8~4.7。

通过模拟实验表明, 在贡嘎山地区最为常见的小到中雨类型分布下, 土壤养分过程就会产生剧烈的变化, 并强烈地影响矿质养分元素等在森林土壤中的迁移输出规律。表层植被破坏引起的土壤结构改变和养分流失在短时间内就可完成, 而且难以恢复。

参考文献

- [1] Li X W(李贤伟), Luo C D(罗承德), Hu T X(胡庭兴), *et al.* Suggestions on restoration and reconstruction of degraded forest ecosystem in the upper reaches of the Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 2001, **21**(12): 2117~2124.
- [2] Likens G E and Bormann F H. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*, Second Edition. New York: Springer-Verlag, 1999. 122~129.
- [3] Zhong X H(钟祥浩), Luo J(罗辑), Wu N(吴宁), *et al.* eds. *Researches of the forest ecosystems on Gongga Mountain* (in Chinese). Chengdu: Chengdu Scientific & Technological Press, 1997.
- [4] Chen F B(陈富斌) and Luo J(罗辑) eds. *Researches of the alpine ecological environment of Gongga Mountain*, Vol. 2 (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1998.
- [5] Yi L Q(易立群), Miao R(缪韧), Lin S Y(林三益). A study on the hydrological features of a small forested catchment on Mt. Gongga. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)* (in Chinese)(四川大学学报(工程科学版)), 2000, **32**(1): 87~92.
- [6] Shan B Q(单保庆), Yin C Q(尹澄清), Bai Y(白颖), *et al.* Study on phosphorus load from a watershed with rainfall simulation method. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese)(环境科学学报), 2000, **20**(1): 33~37.
- [7] The Committee of Agrochemistry, Soil Science Society of China. *The analysis methods of soil chemistry*. Beijing: Science Press, 1983.
- [8] APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 16th edition. Washington: American Public Health Association, 1985, 143~488.
- [9] Tang H X(汤鸿霄). *Chemical principles of water and wastewater*. Beijing: China Architecture and Building Press, 1979.
- [10] Wang L J(王良健), Li X M(李显明), Lin Z Y(林致远). A discussion on the soil below dark coniferous forests of the high mountains in southeast China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese)(地理学报), 1995, **50**(6): 542~551.
- [11] Zhu X F(朱晓帆), Jiang W J(蒋文举), Zhou L(周励), *et al.* The relationships between the buffer capacity of soil and the growth of the fir at Emei Mountain by simulated acid rain. *China Environmental Science* (in Chinese)(中国环境科学), 1998, **18**(1): 21~24.
- [12] Zhong X H(钟祥浩) and Luo J(罗辑). Study of characteristics of ecological function of the natural and degraded ecosystems in the mountain dark coniferous forest zone in Mt. Gonggashan. *Journal of Mountain Science* (in Chinese)(山地学报), 2001, **19**(3): 201~206.
- [13] Luo J(罗辑), Zhao Y H(赵义海), Li L F(李林峰). A preliminary research on the carbon cycle of *Abies fabri* forests of the east slope of the Gongga Mountain. *Journal of Mountain Science* (in Chinese)(山地学报), 1999, **17**(3): 250~254.
- [14] Markewitz D, Davidson E A, Figueiredo R de O, *et al.* Control of cation concentrations in stream waters by surface soil processes in an Amazonian watershed. *Nature*, 2001, **410**: 802~805.
- [15] Beven K and Germann P. Macropores and Water Flow in Soils. *Water Resour. Res.*, 1982, **18**(5): 1311~1325.
- [16] Vervoot R W, Radcliffe D E, West L T. Soil structure development and preferential solute flow. *Water Resour. Res.*, 1999, **35**(4): 913~928.
- [17] Ou Z Q(区自清), Jia L Q(贾良清), Jin H Y(金海燕), *et al.* Macropores and preferential flow and their effects on pollutant migration in soils. *Acta Pedologica Sinica* (in Chinese)(土壤学报), 1999, **36**(3): 341~347.
- [18] Buchter B, Hinz C, Flury M, *et al.* Heterogeneous flow and solute transport in an unsaturated stony soil monolith. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, **59**: 14~21.
- [19] Quisenberry V L, Phillips S E, Zeleznik J M. Spatial distribution of water and chloride macropore flow in a well-structured soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, **58**: 1294~1300.
- [20] Chen Z X(陈志雄), Zhou L Y(周凌云), Xu C X(徐楚雄), *et al.* The solute transport in the infiltration processes. In: Xu F A(徐富安) and Zhou L Y(周凌云) eds. *Studies on the agricultural ecosystem of Yubei Plain*, Vol. 2. Beijing: Meteorological Press, 1999. 7~24.
- [21] Ellsworth T R, Jury W A, Ernst F R, *et al.* A three-dimensional field study of solute transport through unsaturated and saturated porous media. 1. Methodology, mass recovery and mean transport. *Water Resour. Res.*, 1991, **27**: 951~965.