

研究報告

崩塌對溪流水化學之影響—以六龜試驗林中寮溪為例

王秋嫻¹ 黃瓊彪¹ 盧惠生¹ 劉瓊靄^{2*}

【摘要】本試驗收集2003-2007年間，六龜試驗林中寮溪上游至下游共4處取樣點之水樣，除了分析乾、濕季溪流水化學之變化，亦探討颱風所造成之崩塌對溪流水化學之影響。分析結果顯示Na、K、Mg、F、PO₄、SO₄、HCO₃、總離子濃度於乾季明顯高於濕季，而懸浮值、H、NH₄、Cl、NO₂、NO₃及TN之濃度於濕季較高。此外，溪水中Na、K、Mg、PO₄、SO₄、HCO₃及總離子濃度於4取樣點都在崩塌後有增加之趨勢，上游崩塌面積最大處影響亦最大，該處總離子濃度較崩塌前增加了31%，顯示崩塌後由溪流所輸出的營養鹽會增加；但TN於崩塌後則有減少之情形。

【關鍵詞】六龜試驗林、崩塌、中寮溪、水化學、營養鹽輸出

Research paper

Effects of Landslides on Water Chemistry – A Case Study in Chungliang Stream of Liouquei Experimental Forest

Chiu-Hsien Wang¹ Chiung-Piau Huang¹ Hui-Sheng Lu¹ Chiung-Pin Liu²

【Abstract】The Chungliang stream was studied with regard to water chemistry between dry and wet season and the impact of landslides. Water samples were collected in four sampling sites along Chungliang stream from upstream to downstream of Liouquei Experimental Forest during 2003-2007. Results showed that the concentrations of Na, K, Mg, F, PO₄, SO₄, HCO₃ and total ions in the dry season were significantly higher than in the wet season. On the contrary, the concentrations of suspended solids, H, NH₄, Cl, NO₂, NO₃ and TN were higher in the wet season. In addition, there was an increasing trend in the concentrations of Na, K, Mg, PO₄, SO₄ and HCO₃ after landslides. The strength of the relationship between ion concentration and landslide areas was the highest in the biggest landslide area, up to 31 % increase in ion concentrations. This provided that nutrient outputs were greatly increased after landslides. However, the concentrations of TN in streamwater reduced after landslides.

【Key words】Liouquei Experimental Forest, Landslide, Chungliang stream, Water chemistry, Nutrient outputs.

1. 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組。

Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

2. 國立中興大學森林學系，通訊作者。電子郵件: cpliu@nchu.edu.tw

Department of Forestry, National Chung Hsin University. E-mail: cpliu@nchu.edu.tw.

一、前言

森林集水區經由生物地質化學研究，可明瞭土壤化育及地景形成的過程，尤其是溪流水化學的研究，更是分析集水區內化學風化作用位置與時間及逕流生成機制的關鍵 (Anderson and Dietrich, 2001; Tsujimura *et al.*, 2001)。溪流水化學的變化常受降雨、土壤性質、植被類型、生物作用、自然及人為擾動等因子所影響 (Hornbeck *et al.*, 1997)，故由溪流水化學的研究可以反映出集水區的動態變化，可作為環境變化監測指標。

台灣位處於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處，經年受到板塊運動影響，造山運動活躍，使得地形相當陡峻且地質脆弱；又因位於季風帶，每當颱風或豪雨侵襲時，容易導致崩塌災害，崩塌是發生在山坡地的自然現象，也是地形演育的必然結果。崩塌致災因子可分為潛因和誘因，其中誘因主要為降雨及地震；而潛因則包含自然因子及土地利用 (詹勳全等，2015；林昭遠等，2016)。崩塌除會帶給生物直接之傷亡威脅外，亦會對自然環境造成影響，其影響程度可藉由比較崩塌前後集水區溪流水水化學而瞭解。

2005年7月強烈颱風海棠 (Haitang, 2005/7/18) 侵襲台灣本島，不僅帶來強風豪雨，且使六龜試驗林中寮溪沿岸發生許多大大小小的崩塌，由於崩塌後大量植被及泥砂被沖刷至溪底，其對溪流水之水化學勢必會有影響，故本報告藉由六龜試驗林中寮溪設置的水質監測點，分析崩塌前後溪流水之化學變化，以探討崩塌對溪流水化學的影響。此外，由於試驗林地區乾濕季分明，本研究亦對乾濕季之溪流水化學變化進行探討，以了解乾、濕季水中離子在集水區內的移動路徑。

二、材料與方法

(一) 試驗地概述及水樣取樣點

中寮溪位於高雄縣六龜鄉林業試驗所六龜

試驗林內，中寮溪集水區的年平均雨量約2,880 mm，年平均溫度約19 °C，年平均最高溫度約23 °C，年平均最低溫度約11 °C，年相對濕度約86 %，地質為中新世廬山層，岩石由硬頁岩、板岩及硬砂岩組成，土壤質地為壤土與黏質壤土，土地利用為天然闊葉林與人工林 (盧惠生等，2006)。

中寮溪集水區面積721 ha，主流長度6.9 km，平均坡降15.8 %，沿著中寮溪主流由上而下設有4處水質取樣點 (圖1)，分別為中寮溪4號 (CL-4)、中寮溪3號 (CL-3)、中寮溪2號 (CL-2) 及中寮溪1號 (CL-1)，每一水質取樣點距離源頭集水區主流長度分別為0.4 km、1.9 km、5.0 km及6.9 km，海拔高分別為1,650 m、1,250 m、700 m及520 m，所包含集水區面積分別為18 ha、137 ha、464 ha及721 ha。至於各集水區平均坡度甚陡，均超過50 %，分別為53.3 % (CL-4)、52.8 % (CL-3)、60.8 % (CL-2) 及59.7 % (CL-1) (表1)。另中寮溪上游設有一座氣象站，為鳳崗山站 (FK)。

本試驗於2003~2007年期間，每月上、中、下旬各前往4處水質取樣點取水一次，其中中寮溪3號 (CL-3) 於乾季 (10月~3月) 時常未能取到水樣，因其水源被下游居民截取，且多成伏流水。此外，本研究收集期間因適逢強烈颱風海棠侵襲台灣本島，帶來強風豪雨，並造成中寮溪沿岸多處崩塌，尤其以上游鳳岡林道12.3 K處形成一大型之地滑最為嚴重，其位置約在CL-4與CL-3兩取樣點之間 (圖2)，整個範圍已由航空照片圖確認，面積約2.95 ha，此一崩塌亦造成鳳岡林道路基流失約168,000 m³，路面毀損150 m，因交通受阻，故水樣採集一度中斷 (從2005年7月到9月)，至該年10月才得以繼續收集，此外，於CL-4上游沿岸及CL-3至CL-2之間亦有多處小面積的崩塌。



圖1. 中寮溪集水區示意圖 (CL-1,2,3,4為中寮溪水質取樣點，FK為鳳崗山站氣象站)。

Fig. 1. Map of Chungliiao stream watershed. (CL-1,2,3,4 as sampling points of Chungliiao stream, FK as Fonkongshan weather station).

表1. 中寮溪水質取樣點集水區地形特性

Table 1. Topographical characteristics of Chungliiao stream watershed

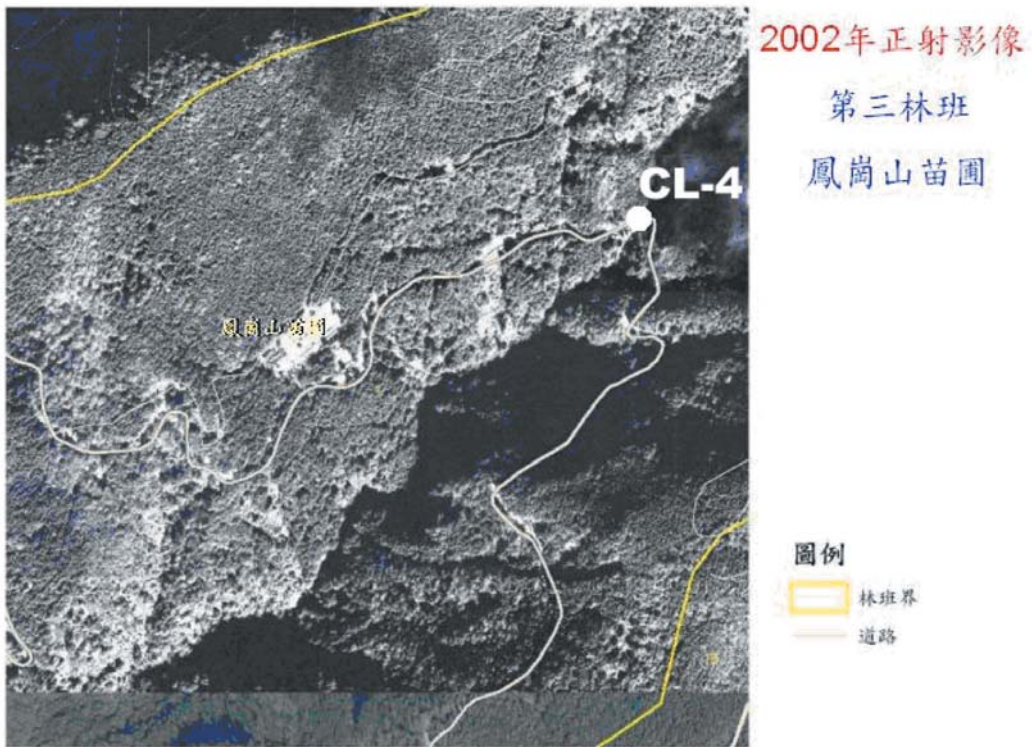
集水區	面積(ha)	平均坡度(%)	最低海拔高度(m)
中寮溪4號(CL-4)	18	53.3	1650
中寮溪3號(CL-3)	137	52.8	1250
中寮溪2號(CL-2)	464	60.8	700
中寮溪1號(CL-1)	721	59.7	520

(二) 水樣分析方法

利用瓢掬法取水樣500mL，儘速送至實驗室進行化學物質分析，運送過程不超過6小時。水樣抵達實驗室後，馬上測定電導度 (WTW LF 340, Germany) 及pH值 (Metrohm 691, Switzerland)，其餘水樣經0.45 μm 濾膜 (Gelmanscience GN-6 grid 0.45- μm sterilized filter paper, Germany) 過濾後，濾紙以105°C

烘乾後稱重以定量懸浮質濃度。濾液則置於恆溫箱 (4°C) 以備測定陰離子 (F, Cl, NO₃, SO₄, HCO₃)、陽離子 (Na, K, Ca, Mg 及NH₄)、及總氮 (TN) 等。其中陰、陽離子除HCO₃是以0.005 N H₂SO₄ 滴定到pH 4.52 定量外 (APHA, 1995)，其他則以離子層析儀 (DX-120, USA) 測定。總氮 (TN)則以總有機碳氮分析儀 (high TOC, Germany)測定。

(1) 崩塌前



(2) 崩塌後



圖2. 中寮溪集水區崩塌前後航照圖。

Fig. 2. Map of aerial photograph at Chungliao stream watershed before (1) and after (2) landslides.

三、結果與討論

(一) 乾、濕季之溪流水化學變化

如表2的中寮溪水化學分析顯示，溪水之pH偏弱鹼性，陽離子以Ca濃度最高，Mg、Na次之，陰離子以HCO₃濃度最高，SO₄次之。

由鳳岡山氣象站2003~2007年間之月平均雨量(圖3)，顯示該區之乾、濕季節分明，雨量集中在4月至9月，占平均年雨量的89%，故本研究將4月至9月定為濕季，10月至3月定為乾季。分析2003~2007年間中寮溪上游至下游4取樣點於乾季(總樣本數為295)、濕季(總樣本數為285)之溪水化學變化，由表2分析結果顯示，pH值皆呈弱鹼性，在乾濕季並無明顯差異，然懸浮值、大部份之離子(Ca除外)、總離子濃度及TN於乾、濕季均有顯著的差異，其中的Na、K、Mg、F、PO₄、SO₄、HCO₃、總離子濃度於乾季明顯高於濕季，其餘之懸浮值、H、NH₄、Cl、NO₂、NO₃及TN之濃度於濕季反較高。

溪流水來源可概分為三途徑：直接降水、表層土壤水及深層地下水，透過水化學分析，可作為水文歷線基流分離之依據(Salmon *et al.*, 2001)。歸納近年國內學者(王立志等, 1998; 王立志等, 1999; 王立志等, 2010;

黃正良等, 2007; 廖學誠等, 2002)分別於福山、六龜、蓮華池及溪頭試驗林所做有關溪水無機離子濃度與降雨量(或溪水流量)之關係可發現，大部分之試驗結果皆得到電導度、Ca、Mg、SO₄及HCO₃的濃度隨著降雨量(或流量)升高而下降；懸浮值、K、NO₃的濃度則隨著降雨量(或流量)上升而升高，其餘離子濃度的變化則因地各異。一般認為豐水期時，溪水主要來自雨水和地表逕流，致使存於森林枯枝落葉及土壤表層之離子(如懸浮值、K、NH₄、NO₃)被淋洗與沖刷至溪水中(王立志等, 1999)；枯水期時，河川流量主要來自深層逕流，故乾季溪水中的離子(如電導度、Na、Ca、Mg、Cl、SO₄、HCO₃)主要來自深層岩石或土壤(金恆鏞等, 1984; Wayne *et al.*, 1989)。本研究結果與上述前人研究不盡相同，其原因除了各試驗地之立地條件不同外，總試驗期間之長短亦不一，由於上述國內研究多量測一個颱風前後數日(或數月)之暴雨期間的變化，然本試驗收集的時間較長(計4年)，加上乾季時CL-3常未能採集到水樣。故推測本試驗區濕季溪水主要來自雨水和地表逕流，乾季則大部分源自岩石和土壤溶解的深層逕流，因此Na、K、Ca、Mg、PO₄、HCO₃等風化作用產生的離子有較高濃度。

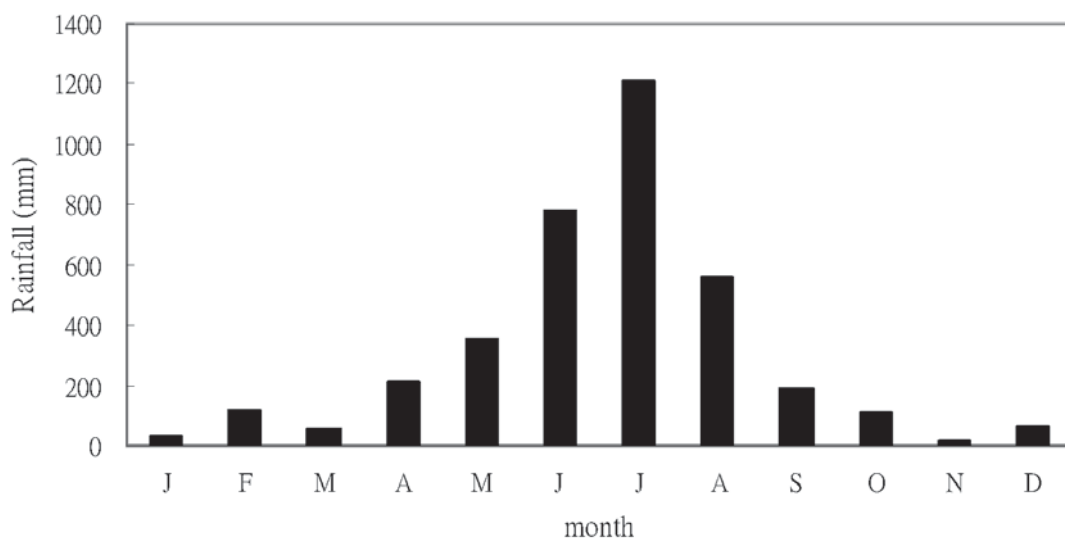


圖3. 鳳崗山氣象站月平均雨量圖 (2003~2007)。

Fig. 3. Map of monthly average rainfall in Fonkongshan weather station (2003-2007).

(二) 崩塌前後之溪流水化學變化

圖4為崩塌前後之溪水水化學變化，2003~2007年間中寮溪上游至下游4取樣點於崩塌前(總樣本數為307)及崩塌後(總樣本數為273)之養分當量濃度顯示，4取樣點之電導度、Na、K、Mg、Ca、PO₄、SO₄、HCO₃、總離子濃度及TN於崩塌前後皆有明顯改變，其中Na、K、Mg、Ca、PO₄、SO₄、HCO₃及總離子濃度於4取樣點都於崩塌後有增加之趨勢(CL-1的Ca除外)，其中以PO₄增加的倍數最多，愈往下游增加愈多；TN濃度則相反，即4取樣點皆有崩塌後減少之情形。如以總離子濃度而

言，CL-4、CL-3、CL-2、CL-1於崩塌後分別為崩塌前的1.25倍、1.31倍、1.09倍及1.06倍，以CL-3處增加31%為最多，因此次最大崩塌地位於CL-4至CL-3之間，CL-4上游沿岸亦有小面積崩塌，故對CL-3的影響最大，但流至CL-2後，因為森林集水區面積增加，河川本身的自淨及稀釋作用，使得總離子濃度增加不明顯。由上述結果可發現，崩塌後由溪水所輸出的營養鹽大為增加，加上本研究於崩塌後初期之2個多月因道路中斷未能採到水樣，故實際營養鹽流失之情形可能還更為嚴重。

表2. 中寮溪乾、濕季溪流水化學分析結果(2003~2007)

Table2. The analysis of Chungliao streamwater chemistry between dry and wet seasons (2003-2007)

	乾季	濕季	p值
Suspended Solids (mg/L)	4.4 ± 5.0	4.5 ± 6.0	0.007**
Conductivity (mS/cm)	257.8 ± 113.6	205.2 ± 111.4	0.051
pH	8.1 ± 0.3	8.0 ± 0.3	0.516
H (μeq/L)	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.003**
Na (μeq/L)	273.0 ± 140.6	200.8 ± 105.9	0.000***
NH ₄ (μeq/L)	0.1 ± 0.5	0.3 ± 1.1	0.000***
K (μeq/L)	8.5 ± 4.8	7.5 ± 4.1	0.024*
Mg (μeq/L)	915 ± 587	643 ± 483	0.000***
Ca (μeq/L)	1316 ± 582	1062 ± 591	0.486
F (μeq/L)	4.9 ± 2.4	4.2 ± 1.9	0.011*
Cl (μeq/L)	18.7 ± 5.6	18.9 ± 5.9	0.047*
NO ₂ (μeq/L)	0.6 ± 1.2	0.9 ± 1.3	0.012*
NO ₃ (μeq/L)	13.1 ± 11.5	26.1 ± 14.1	0.000***
PO ₄ (μeq/L)	1.0 ± 3.1	0.7 ± 1.7	0.013*
SO ₄ (μeq/L)	869 ± 431	693 ± 426	0.037*
HCO ₃ (μeq/L)	1784 ± 949	1324 ± 760	0.001***
Total (μeq/L)	5204 ± 2512	3973 ± 2285	0.009**
TN (mg/L)	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.000***

註：數值為平均值±標準差，p值為T檢定(雙尾檢定)之統計分析結果；*表示達0.05顯著水準；**表示達0.01顯著水準；***表示達0.001顯著水準。

劉瓊霖等 (2005)於烏石坑崩塌試驗地亦發現溪水離子濃度明顯大於一般森林流出的溪水，其原因除了植物死亡，對土壤中無機養分的吸收減少外，也因土石裸露面積增加，風化作用加速，一旦經雨水淋洗沖刷，無機離子溶解於水中，勢必會提高溪水中之無機離子濃度。Hornbeck *et al.* (1997)指出，溪流中 SO_4 的來源除了雨水外，另一重要來源可能是含硫化鐵岩石風化作用所產生，或如Houle和Carignan (1985)所提出 $\text{SO}_4\text{-S}$ 是來自土壤有機硫貯積的釋放，而 SO_4 的輸出被認為是伴隨土壤風化作用所產生之Ca一同輸出，而使得 SO_4 和Ca在溪流中之當量濃度呈明顯正相關。另外溪水中之無機陰離子輸出量以 HCO_3 濃度為最高，反映出本試區土壤微生物活動旺盛，除了呼吸作用所排放之 CO_2 外，可能因此試區的礦物質含量豐富，在高溫高濕的亞熱帶氣候，風化極強，故易攜出產生 HCO_3 (Baron, 1991)。依此亦可推論崩塌後溪水中的 SO_4 、Ca和 HCO_3 濃度增加之情形，乃因土壤風化作用增強所致。

本試驗有關N在崩塌前後的改變可發現， NH_4 濃度於CL-3和CL-2有崩塌後增加之趨勢， NO_2 濃度在CL-2和CL-4及 NO_3 濃度在CL-4亦有崩塌後增加之情形，其餘差異並不顯著。有學者指出土壤的硝化作用會因干擾而導致 NO_3 的流失加速，硝化作用加速的結果會使土壤的H濃度增加，此些H又會置換出交換性陽離子，如Ca等，因此土壤水中交換性陽離子的多寡和 NO_3 有高度相關 (Tokuchi *et al.*, 1999)。崩塌後溪流4取樣點之TN濃度皆明顯降低，如上述由於部分無機氮 (NH_4 、 NO_3 、 NO_2)於崩塌後有增加之情形，故表示此試驗地崩塌後有機氮大為減少，推測因崩塌後地上部之植被及枯枝落葉層遭毀壞，土壤裸露導致土壤微生物相的改變及土壤水分含量減少，使土壤有機質含量銳減，而導至溪水的有機氮濃度隨之降低。

試驗結果亦顯示，pH值於崩塌前有愈向下游鹼性愈強之趨勢，然崩塌前後pH值差異並不顯著。崩塌前溪水之電導度、Na、K、Ca、

Cl、 SO_4 、 HCO_3 及總離子濃度皆有從上游 (CL-4)至下游 (CL-1)逐漸增加之趨勢，崩塌後亦有相同之現象。造成溪流上、中、下游濃度差異的原因，可能與溪流中的岩石有關，當溪水流經這些岩石時，易使其風化而釋出離子，因此愈往下游，經此作用累積的離子濃度則愈高 (Bailey *et al.*, 1995)，另隨著溪水的流動，溪水濱岸帶的養分不斷輸入，也會使溪水所含無機養分由隨上游至下游濃度逐漸增高(劉瓊霖等, 1998)。

四、結論

本試驗地乾濕季之溪流水化學有明顯之變化，顯示集水區內豐水期和枯水期之水流路徑不同，推測濕季溪水主要來自雨水和地表逕流，乾季除了大部分來自深層逕流外，尚有一部分來自雨水或地表逕流。另崩場地造成營養塩由溪流大量輸出之情形，可作為崩場地整治之參考，並即早進行復育，以減緩土壤風化速率，防止生育地退化。

五、謝誌

本研究感謝本所六龜研究中心黃榮俊先生協助水樣採集，水質實驗室賴鏡惠小姐、蘇怡靜小姐協助水質化學試驗分析，謹此致謝。

六、參考文獻

- 王立志、鄧子菁、夏禹九、金恆鏞、劉瓊霖 (1998) 1996年葛樂禮颱風期間福山試驗林溪流水化學變化之研究。臺大實驗林研究報告 12(3):189-201。
- 王立志、鄧子菁、夏禹九、金恆鏞、劉瓊霖、林登秋 (1999) 1996年賀伯颱風期間福山試驗林溪流水化學變化之研究。中華林學季刊 32(2):217-232。
- 王立志、羅士福、陳信雄、魏聰輝、賴彥任、張振生 (2010) 溪頭試驗林2005年泰利颱風期間溪流水化學變化。中華林學季刊 43(3):395-412。

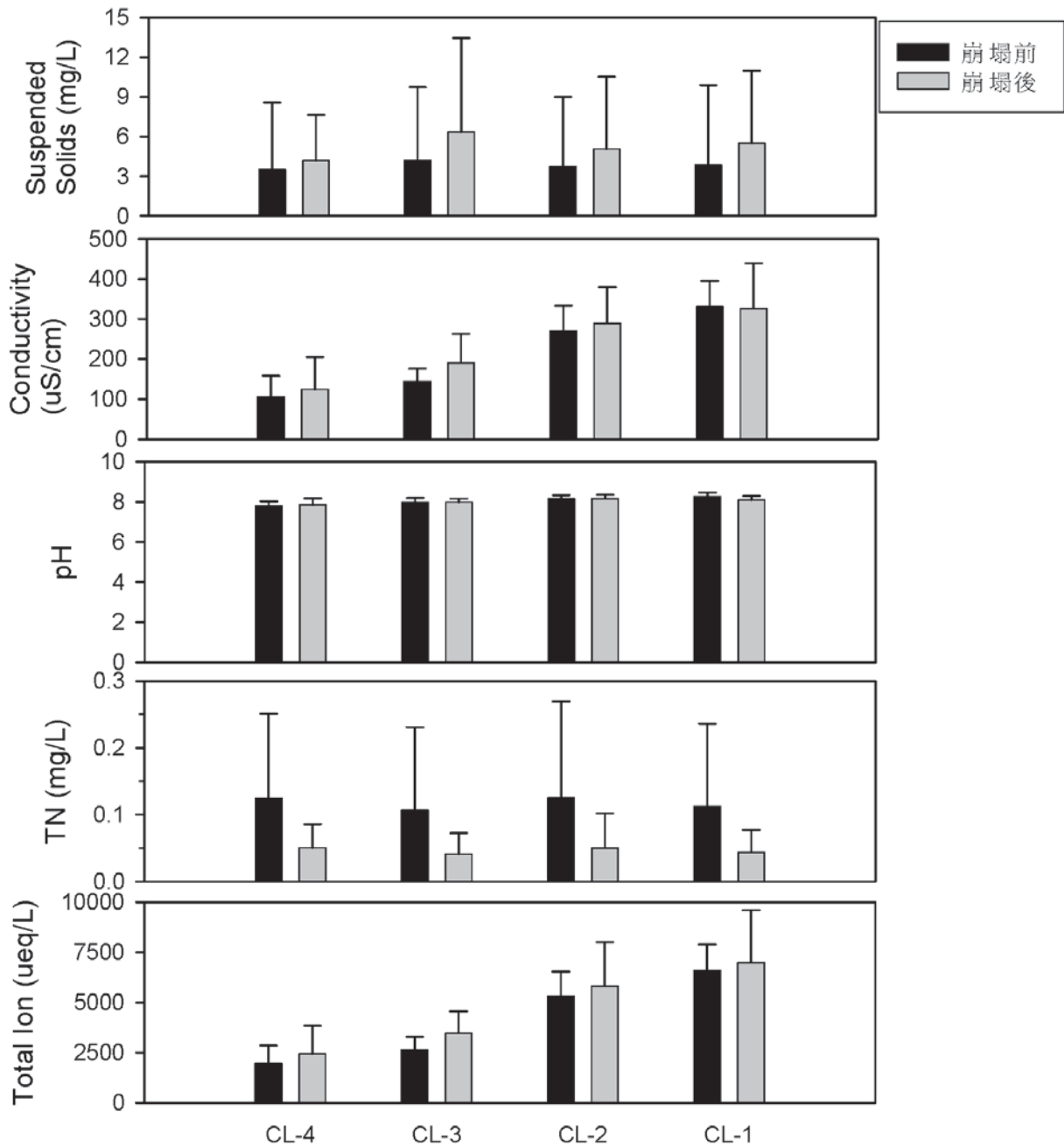


圖4. 中寮溪 (四取樣點由上游至下游分別為CL-4、CL-3、CL-2、CL-1)崩塌前後之水化學變化。

Fig.4. Map of Changes in Chungliao streamwater chemistry before and after landslides (four sampling points are CL-4、CL-3、CL-2、CL-1 from headstream to downstream individually).

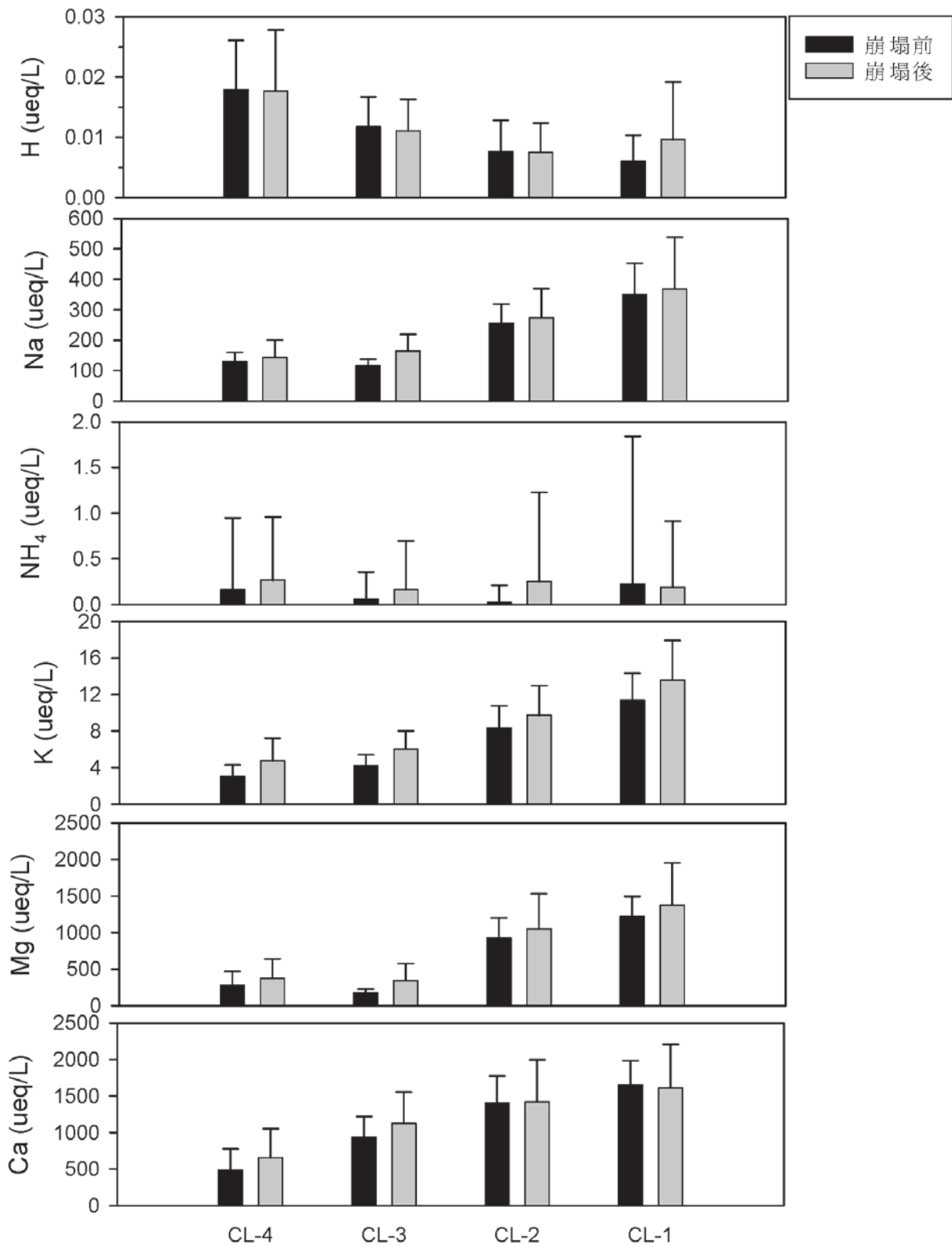


圖4. (continued)。

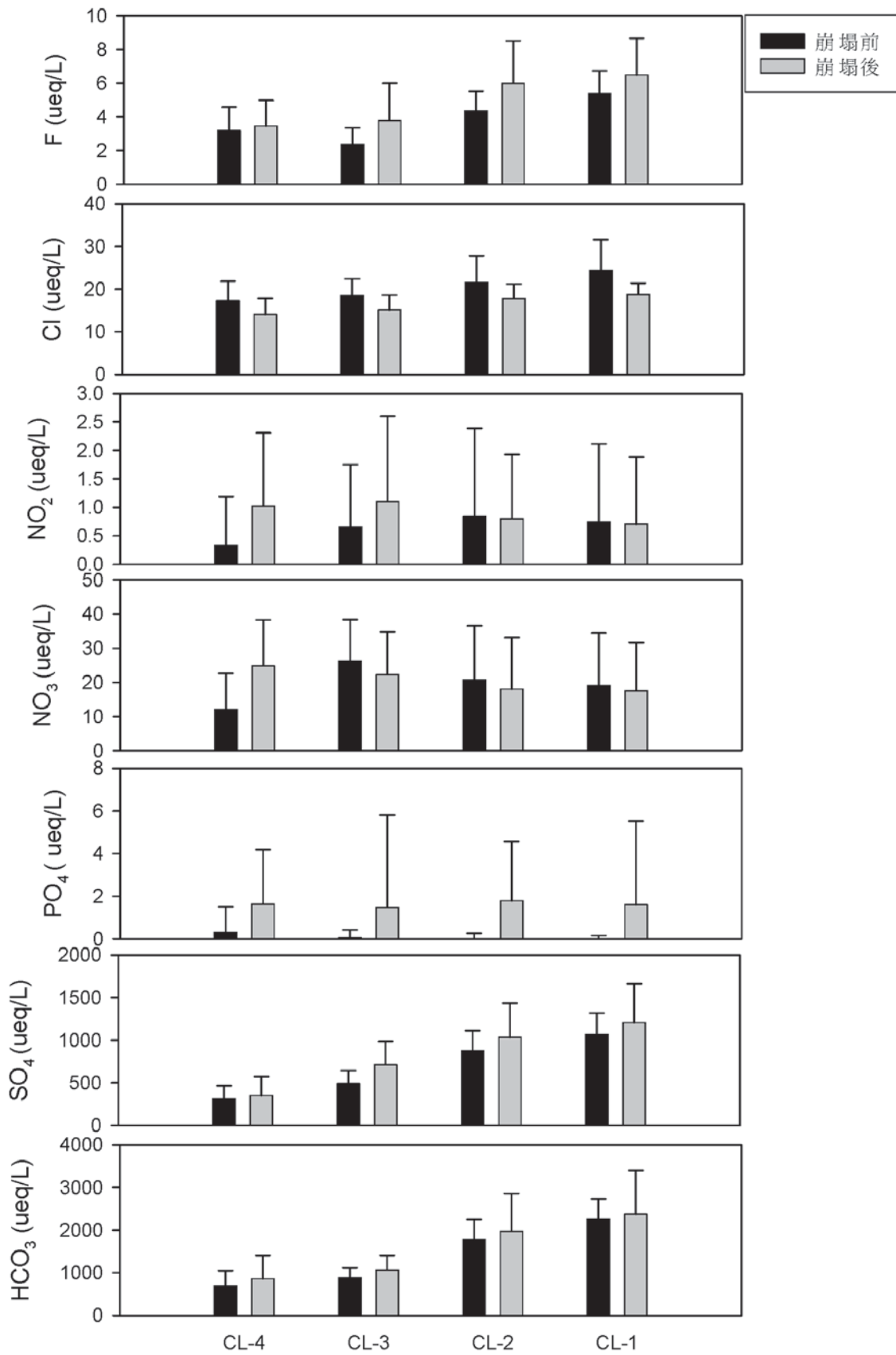


圖4. (continued)。

- 金恆鑣、夏禹九、黃正良、陳春雄、楊炳炎 (1984) 蓮華池試驗集水區暴雨時期水文特性及其溪水、懸浮值與養分濃度的關係。林試所試驗報告。42頁。
- 林昭遠、陳正德、傅桂霖 (2016) 應用環境指標萃取荖濃溪集水區深層崩塌區位。水保技術 9(5):1-9。
- 黃正良、廖學誠、金恆鑣、陳明杰、李福明 (2007) 2001年桃芝颱風蓮華池人工林及天然林集水區溪流化學之比較。臺大實驗林研究報告 21(1):53-63。
- 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生 (2015) 台灣山區淺層崩場地特性調查與分析。中華水土保持學報 46(1) : 19-28。
- 廖學誠、金恆鑣、黃正良、劉瓊霏 (2002) 1999-2000年台灣南部六龜森林集水區溪流離子濃度與流量關係之研究。國立臺灣師範大學地理研究報告 37 : 95-112。
- 劉瓊霏、許博行 (1998) 關刀溪森林集水區降水及溪水水化學。中興大學實驗林研究彙刊 20(2) : 71-78。
- 劉瓊霏、何冠琳、許博行 (2005) 造林對921地震崩場地土壤性質與土壤水之影響。林業研究季刊 27(3) : 1-10。
- 盧惠生、林壯沛、黃良鑫、林介龍、王秋嫻 (2006) 六龜試驗林中寮溪泥砂啓動推估。坡地防災學報6(1) : 1-18。
- Anderson, S. P. & Dietrich, W. E. (2001) Chemical weathering and runoff chemistry in a steep headwater catchment. *Hydrological Processes* 15, 1791-1815.
- APHA (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. A.D. Eaton, L. S. Clesceri, and A. E. Greenberg, eds. 19th edition. United Book Press, Baltimore, MD.
- Bailey, S. W., Driscoll, C. T. & Hornbeck, J. W. (1995) Acid-base chemistry and aluminum transport in an acidic watershed and pond in New Hampshire. *Biogeochemistry* 28, 61-91.
- Baron, J. (1991) Biogeochemistry of a subalpine ecosystem. Springer-Verlag. 247pp.
- Hornbeck, J. W., Bailey, S. W., Buso, D. C. & Shanley, J. B. (1997) Stream chemistry and nutrient budgets for forested watershed in New England : variability and management implications. *Forest Ecology and Management* 93, 73-89.
- Houle, D. and Carignan, R. (1995) Role of SO₄ adsorption and desorption in the long-term S budget of a coniferous catchment on the Canadian Shield. *Biogeochemistry* 28, 161-182.
- Salmon, C. D., M.T. Walter, L.O. Hedin & Brown M.G. (2001) Hydrological controls on chemical export from an undisturbed old-growth Chilean forest. *Journal of Hydrology* 253, 69-80.
- Tokuchi, N., Takeda, H., Yoshida, K. & Iwatsubo, G. (1991) Topographical variations in a plant-soil system along a slope on Mt Ryuoh, Japan. *Ecology Research* 14, 361-369.
- Tsujimura, M., Onda Y. & Ito, J. (2001) Stream water chemistry in a steep headwater basin with high relief. *Hydrological Processes* 15, 1847-1858.
- Wayne, F. M., W. B. Anderew, F. D. Thomas & McKenneth, D. (1989) Nutrient concentration – stream discharge relationships during storm events in a first-order stream. *Journal of Hydrology* 179, 97-102.

