

不同水源及加氯量對PVC管線中餘氯 濃度變化的研究

Chlorine Concentration Decay in PVC Pipes Under Different Water Sources and Added Chlorine Levels

蔡長憲¹、李連堯²、盧重興³

摘要

過去關於配水系統水質的研究中，常以餘氯消耗速率做為水質受污染程度的指標，以了解水質在配水管中的變化情形。一般而言，在配水管線系統中，影響餘氯的消耗原因非常複雜，包括物理性、化學性及生物性等多種因素。

本研究的目的是在探討不同水源及加氯量下，PVC管線中餘氯在各種水力停留時間下的消耗情形。另外，亦針對管線中不同的採樣位置及特殊管型，觀察餘氯濃度的變化。由試驗結果顯示，在不同水源方面，去離子水較自來水及地下水有較低的餘氯消耗速率；在加氯量方面，低加氯量比高加氯量有較高的餘氯消耗速率。此外，不論操作條件為何，在孔穴中餘氯濃度會有明顯的下降。而在改變水力停留時間的結果中亦發現，上述各種餘氯的變化情形，皆會隨水力停留時間的延長而增大。

壹、前言

在過去的研究中，餘氯被公認為研究自來水配水系統水質污染最好的依據。自來水在到達用戶前的水質優劣受餘氯濃度影響甚大，餘氯在自來水送達消費者前必須維持足夠濃度以上。有關配水管網中水質變化的情形，目前國內只有林氏與李氏（民國73年）曾對蘇澳第二淨水廠供水地區的配水管末水質變化進行探討。至於詳細的管線水質監測資料與二次污染原因國內至今尚未建立與明瞭，以致於無法對水質做有效的控制。因此，研究配水管線中水質的變化情形，瞭解本土化的配水管線中餘氯的消耗速率及微生物對水質所造成的影響實屬必要。

本研究的目的是在利用連續式PVC管線系統進行試驗，以探討不同的水源及不同加氯量下，PVC管線中餘氯在各種水力停留時間下的消耗情形。另外，亦將針對管線中不同的採樣位置及特殊管型，觀察總餘氯及自由餘氯濃度的變化情形，以作為日後設計、操作及監視輸送管線的參考依據，進而解決配水系

¹ 國立中興大學環境工程學系學士班

² 國立中興大學環境工程學系博士班

³ 國立中興大學環境工程學系教授

統的水質二次污染問題，提高飲用水質的安全。

貳、影響配水系統中餘氯消耗的原因

一、物理性因子

1. 溫度

管壁腐蝕速率會隨溫度升高而增加，且溫度升高亦會增加微生物的生長速率，進而加快管壁生物膜的累積繁殖。

2. 管材

在配水系統中所使用的管材，它們本身亦會對餘氯有一定的消耗，而實際上的消耗速率要視管材、管徑及管齡等因素而定。Sharp et al. (1991)研究指出，在相同的管徑、長度下，鑄鐵管對餘氯的消耗速率比 PVC 管大，這是由於自由餘氯會與鐵離子反應生成不溶性的氫氧化鐵。

3. 濁度

清水 (Finished water) 中的濁度易使配水管線產生沈澱物、多孔性積垢與鏽瘤 (rust) 等現象，而且微生物常藉有機性微粒與藻類顆粒等在水中傳送，使得消毒劑無法有效的控制微生物的生長。

4. 水流速度

配水管在高流速時，除稀釋效應較大外，另有助於具有保護性物質以較高的傳輸速率傳送到管壁表面形成保護性被覆。但在高流速時，則會有沖蝕腐蝕或衝擊管壁的現象發生，此時保護管壁的被覆或管材，由於這種機械作用力而被侵蝕。在非常低的流速或有停滯流發生時，則會加速水管水垢 (tuberculation) 和穿孔 (pitting) 等問題發生。

5. 管型及不規則管壁

配水系統幾何形狀對流速分布亦有很大的影響。配水管線中有許多障礙物、管壁粗糙位置及銜接處的空隙 (孔穴)。這些管型的存在，使整個水系統的流況變得複雜，並產生各種大小的分離流、旋轉流和停滯流等，使管線易沈積懸浮微粒及加速微生物再生成 (regrowth)。

二、化學性因子

1. pH 值

若 pH 值低於 7.5 時，水中 HOCl 的分布較佔優勢，此時消毒能力會較強，即表示餘氯消耗速率會較快。反之，若 pH 值高於 7.5 時，水中 OCl⁻ 的分布較佔優勢，故消毒能力會較 pH 值低時為弱，故餘氯消耗速率相對的會較慢。所以，pH 值在餘氯的消耗中扮演著重要的角色。

2. 氯氮

當氯加入水中後，會生成 HOCl 與 OCl⁻，若水中含有氯氮的時候，會反應生成一氯胺 (NH₂Cl)、二氯胺 (NHCl₂)及三氯胺 (NCl₃)，合稱為結合有效餘氯 (combined available chlorine)。結合有效餘氯的生成速率及分布百分比是由 pH 值、溫度、反應時間及最初氯氮比等因素決定。它們亦具消毒能力，但因反應較慢，故會使總餘氯的消耗速度減低。

3. 有機物質

餘氯存於水中會與有機物質 (如 humic acid、fulvic acid 等)反應形成一些消毒副產物，如三鹵甲烷類 (THMs)類致癌物質。由於氯必需先滿足這些物質的需求量，才能發揮其消毒能力，因此會影響到消毒效果及所需的加氯量。

4. 其他物質

Costello (1984)指出自來水在離開淨水廠後，水中所含的化學物質可能會與配水管發生反應，產生沈澱現象，稱為輸出水的沈澱 (postprecipitation)。這些沈澱物的生成，不但會造成管壁組成的改變及水質的惡化，經過長時間的累積，亦可能造成管徑的減小。此外，這些物質也會以還原形態與餘氯發生反應。

三、生物性因子

自來水淨水廠所使用的處理單元並不能完全地防止各種微生物，如藻類、原生動物及昆蟲幼蟲等進入配水系統中。當微生物細胞附著於配水管管壁，並增殖形成一層膜狀或黏泥狀物質時，稱為生物膜 (biofilm)。這些微生物的出現不但使水質惡化，且加速了餘氯的消耗，增加了水質及管線的維護成本。

參、餘氯消耗速率

自來水配水管線中的餘氯消耗可分成兩部分 (Biswas et al. 1993)：

1. 流動水中 (bulk)的餘氯消耗，此部分與自來水本身的水質有關，一般常以 k 符號來表示；
2. 管壁的餘氯消耗，此部分的主要原因與管材的特性有關，一般常以 V_d符號來表示。

考慮水流在穩定狀態下，假設流況均勻、延散係數與平均流速為一定值並忽略軸向延散項時，由質量平衡及混杯濃度的定義，可建立一同時考慮餘氯在流動水中與管壁消耗的模式之解析解：

$$C_{av}(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4J_1^2(\lambda_n)}{(\lambda_n^2 + A_2^2)J_0^2(\lambda_n)} \times \exp\left[-(A_1 + \lambda_n^2 A_0)x\right]$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4A_2^2}{\lambda_n^2(\lambda_n^2 + A_2^2)} \times \exp[-(A_1 + \lambda_n^2 A_0)x] \quad (1)$$

其中

$$A_0 = \frac{\pi L^* D}{Q}; \quad A_1 = \frac{kL^*}{U_{av}}; \quad A_2 = \frac{V_d^* \Gamma_0^*}{D}$$

這三個無因次化的參數決定方程式(1)的解析解。而在物理意義上， A_0 與徑向擴散、管長及流量有關，它是代表徑向擴散對水中餘氯分布的影響。 A_1 為考慮自來水中水質本身對餘氯消耗的影響， A_2 則是代表管壁對餘氯消耗的影響。若乎略了管壁的消耗現象(即 A_2 趨近於零)，則方程式(1)可以簡化為：

$$C_{av} = \exp(-A_1 x) \quad (2)$$

而方程式(2)正是一階反應速率模式的解析解。比較方程式(1)與方程式(2)，可知方程式(2)比方程式(1)簡單許多。為了修正方程式(2)使其能消除與方程式(1)的誤差，可以引入一修正因子 ε ：

$$\varepsilon = \frac{1}{4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp[-(\lambda_n^2 A_0)x]}{\lambda_n^2 \left(\frac{\lambda_n^2}{A_2^2} + 1 \right)}} - 1 \quad (3)$$

則方程式(2)可修正為：

$$C_{av} = \frac{\exp(-A_1 x)}{(1 + \varepsilon)} \quad (4)$$

由式(3)可知 ε 值由 A_0 及 A_2 值決定，其關係式如下：

$$\varepsilon = 2.4416A_0 A_2 - 0.1559A_0 A_2^2 \quad 0.01 \leq A_2 \leq 10 \quad (5)$$

$$\varepsilon = 10.105A_0 + 0.0014A_2 + 0.31A_0^2 A_2 \quad 10 \leq A_2 \leq 100 \quad (6)$$

因此，流動水中的總餘氯消耗 k 值，可利用配水管的中央採樣點(S8)的總餘氯濃度與管末的採樣點(S15)的總餘氯濃度，帶入方程式(4)可求得 ε 及 A_1 值而求出。管壁的餘氯消耗 V_d 值，則可利用(5)或(6)式所求得的 A_2 值轉換而得。

肆、試驗材料與方法

一、試驗設備

1. 反應器主體

本組設備是採用內徑 2cm 的直管，以向下螺旋 15 迴圈(loop)所構成，每一迴圈長為 400cm，全長 6000cm。管線置放於鋼架上，鋼架為長 120cm、寬 80cm、高 150cm 之立方體構造。利用管末端的浮子流量計控制流量，pH

值及溫度則採取自動控制的方式。而為粗略知道管型對配水管中水力特性、餘氯及生物再生成的影響，本組的每套設備均在第 12 及第 15 圖安裝上寬深比 $\alpha=0.5$ 及 1 的孔穴，並在每一迴圈的轉彎處設有採樣點以為彎管的結果（見圖 1）。

2. 採樣點

圖 2 為配水管試驗設備採樣點示意圖。其中第一個英文字代表採樣點的管型（S 表示直管；B 表示彎管；C 表示孔穴），第二個英文字用來分辨當同一迴圈有二個以上的同種管型採樣點（F 表示在迴圈的前端），剩下的數字則用來表示採樣點所在的迴圈數，而各採樣點下方的數字表示距水源入口處的距離（單位：cm）。

二、試驗流程與方法

1. 水源探討

連續式配水管試驗所使用的水源包括地下水、自來水及去離子水，以探討不同水源對配水管線中水質的影響。表 1 為水源來源及其水質。由於自來水源本身已含有一定濃度的餘氯，為確保餘氯來源相同，故須先去除原有的餘氯。本研究取用 10% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 作為去氯物質（LeChevallier *et al.* 1983；Reasoner *et al.* 1985）。

2. 加氯量

本研究的加氯量分成二種。在高濃度上是取自來水法規規定的 1.04 mg/L，而低濃度則約為高濃度的一半，即為 0.59 mg/L。此外，高濃度的結果可代表自來水剛離開自來水廠中餘氯濃度的含量，低濃度則可代表自來水在接近用戶時水中餘氯的含量。

3. 採樣時間（水力停留時間）

在採樣時間方面，因考慮到系統的穩定及系統所能承受的採樣量，故規定所有試程的穩定時間均為水力停留時間的 4 倍，例如若試程水力停留時間為 1 天時，則在 4 天後開始採樣，且每一採樣點的採樣量以不超過 30ml 為主。

4. 餘氯分析方法

本試驗採用 HACH 公司所生產的攜帶型分光光度計（Pocket Colorimeter Chlorine）。此儀器採用 DPD（N,N-diethyl-p-phenylenediamine）- 比色法，可測定自由餘氯及總餘氯，其有效測定範圍在低濃度為 0.01 - 2.20 mg/L，在高濃度則為 2.0 - 4.5 mg/L。

伍、結果與討論

為了方便比較，將餘氯消耗結果依下面的公式，求出不同水源及加氯量下餘氯的消耗率：

$$\text{餘氯消耗率(\%)} = \frac{\text{注入的餘氯濃度} - \text{管末的餘氯濃度}}{\text{注入的餘氯濃度}} \times 100\%$$

以下將分別探討不同水源及加氯量時，在直管、彎管及孔穴中對餘氯濃度所造成的影響：

1. 直管

由試驗結果發現不論試驗條件為何，配水管中的餘氯濃度，整體上隨距離的增加而漸漸下降，並不會因為彎管及孔穴的存在而有明顯的改變。且自由餘氯的消耗率都比總餘氯快，而此結果證明了自由餘氯易與其他物質快速反應消耗的性質，使其在配水系統中無法長時間保持足夠的餘氯濃度。

在不同水源方面，圖 3 為水力停留時間 1 天，流速 0.065cm/s 時，各種水源在不同加氯量下的總餘氯消耗率結果。由結果顯示，不論在高或低餘氯濃度下，餘氯消耗率是地下水 > 自來水 > 去離子水，這結果說明了水源對配水管中的餘氯消耗會有直接的影響。而造成這現象的原因，是因為本研究的自來水是取用中興大學自來水配水管線的水，故會與餘氯反應的物質早就與配水管線中存在的餘氯反應，而使試驗的餘氯消耗結果偏低，再加上地下水的水質檢驗結果大部分水質參數均比自來水及去離子水高，因此在 PVC 管線中，其有較大的餘氯消耗率。

在加氯量方面，由圖 3 結果顯示，不論水源條件為何，餘氯濃度消耗速率趨勢均一樣，故以地下水水源試驗結果為例進行討論。圖 4 為地下水在不同水力停留時間下，高及低加氯量的餘氯消耗率比較。由其結果可知，不論水力停留時間為何，高加氯量的總餘氯消耗率 < 高加氯量的自由餘氯消耗率 < 低加氯量的總餘氯消耗率 < 低加氯量的自由餘氯消耗率，且不論試驗條件為何，水力停留時間愈長餘氯的消耗率愈大。由此可發現淨水廠清水中的餘氯濃度須達一定濃度以上，才能避免快速被消耗。此外，若以高加氯量的結果代表自來水剛離開自來水廠的餘氯濃度量，以低加氯量代表自來水在接近用戶時水中餘氯濃度含量，則由結果亦可知，PVC 管線末端中餘氯對水質的維護能力已大大下降，此時管線將很容易受到生物再生成的污染，對管線中的水質造成非常負面的影響。

綜合以上所有總餘氯與自由餘氯消耗的結果，可知清水在配水管中，不論其水源、加氯量為何，對餘氯消耗率都有明顯直接的影響。若進入配水管中的餘氯濃度未達法規值時，在低濃度的高消耗率及加氯量的不足下，其所導致的高消耗，將使管中的餘氯快速下降，因而失去了維護水質的能力，故配合管線的操作特性，有效的控制加氯量，對配水系統而言相當重要。

2. 孔穴

表 2 至表 4 為不同水源流經孔穴 C12 與 C15 時，餘氯下降率。其中 C12

為較深的孔穴 ($\alpha=0.5$)，C15 為較淺的孔穴 ($\alpha=1.0$)。由結果可發現，不論操作條件、孔穴的幾何形狀為何，餘氯在孔穴的濃度均會快速明顯下降。由水力特性的文獻中 (簡氏，民國 84 年) 可得知，孔穴旋轉流現象會使物質一但由直管進入孔穴後不易流出來，故對如微生物等顆粒而言，會因重力的原因使其進入孔穴後造成物質的累積繁殖，並加速餘氯的消耗。另外，對如餘氯而言，會因為直管與孔穴交界處的分離流而不易進入，再加上水質本身及孔穴管壁的餘氯消耗下，孔穴中餘氯的低濃度及高消耗率將造成配水管線中水質的死角區。為了方便比較討論，將孔穴處餘氯濃度下降結果依下面的公式，求出孔穴餘氯的下降率：

$$\text{餘氯下降率(\%)} = \frac{\text{孔穴前餘氯濃度} - \text{孔穴中餘氯濃度}}{\text{孔穴前餘氯濃度}} \times 100\%$$

以下將分別探討不同水源及加氯量，對孔穴餘率下降率所造成的影響：

在不同水源方面，圖 5 及圖 6 為水力停留時間 1 天，流速 0.065cm/s 時，各種水源在不同加氯量下，深孔穴及淺孔穴的餘氯下降率。由結果顯示，不論在高或低加氯量下，孔穴的餘氯下降率皆以去離子水為最小，而自來水與地下水兩者的下降率大小則不一，此現象與直管部分結論相同。由於地下水及自來水含有較多的雜質，加上孔穴會累積顆粒的特性，因此，在孔穴中去離子水的餘氯下降率最小。

在加氯量及孔穴的幾何形狀方面，由圖 5、圖 6 結果顯示，不論水源條件為何，在淺孔穴中，餘氯濃度下降率不會因加氯量的改變而有明顯的改變，但對深孔穴而言，餘氯濃度則隨著加氯量的上升而降低其下降率，在此以地下水試驗結果為例進行討論。圖 7 為地下水在深淺孔穴中，不同加氯量及水力停留時間下的總餘氯下降率。由結果顯示，不論試驗條件為何，深孔穴的餘氯濃度下降率比淺孔穴的餘氯濃度下降率大，顯示出孔穴中的餘氯濃度和孔穴管型深寬比有非常密切且明顯的關係，這些現象可由孔穴在直管與孔穴交界處及在孔穴內形成分離流的現象來解釋。此外，不論試驗條件為何，孔穴中餘氯濃度的下降率會隨著水力停留時間的增長而增加。

綜合以上所有孔穴餘氯濃度變化結果可知，不論水源、加氯量為何，餘氯在孔穴中其濃度均會明顯的下降。因此，在設計配水系統時應減少孔穴處的存在，並多加強孔穴處的維護與管理，以確保飲水的品質。

3. 彎管處

本研究所設計的管線是採以向下螺旋 15 迴圈，為了能瞭解彎管對水質的影響，故在第 5、8、9 及 14 圓轉彎處設有採樣口，以利彎管部分水質的研究。並取第 9 圓的彎管前 (SF9)、彎管處 (B9) 及彎管後 (S9) 的總餘氯及自由餘氯濃度變化情形的研究。

圖 8 為水力停留時間 1 小時，流速 17.63cm/s 時，各種水源在不同加氯量下，總餘氯在彎管前後變化的結果。由結果顯示，不論水源、加氯量為何，彎

管處餘氯濃度皆略大於彎管前後，而以彎管後餘氯濃度最小。從水力特性觀點來解釋，因彎管中的延散數較小而使餘氯不易與物質發生反應，造成餘氯的累積，故餘氯濃度會稍為上升；而彎管後的餘氯濃度則會因水流所形成的小渦流，使餘氯不易進入，故餘氯濃度會稍略的下降；另外，若以距離來說，餘氯濃度會隨採樣點距離而減小，綜合兩項原因的結果，故彎管後的餘氯濃度最小。此外，由結果亦可發現，不同水源及加氯量對彎管附近餘氯濃度的變化，並不會有明顯的影響。

4. k 值與 V_d 值

模擬過程中所求得的 k 值及 V_d 值如表 6 所示。由表中可知不論是何種水源，水力停留時間愈少，加氯量愈低，k 及 V_d 值就大。此結果即表示，餘氯在流速愈慢或是餘氯濃度較低的 PVC 管中，其在自來水中及管壁的消耗也就愈大。就不同水源而言，不論在高或低加氯量下，自來水與地下水 k 值大小不一，而以去離子水最小；在 V_d 值大小方面，不同水源則無一定規則。

若所使用的水源為地下水時，在高加氯量下，k 值大約在是 $1.9 \times 10^6 - 57.4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ， V_d 值大約在是 $1.27 \times 10^9 - 124 \times 10^9 \text{ m/s}$ ；而在低加氯量時，k 值大約在是 $3.72 \times 10^6 - 114 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ， V_d 值大約在是 $7.38 \times 10^9 - 32.7 \times 10^9 \text{ m/s}$ 。今將 k 及 V_d 值對水力停留時間進行迴歸，可得到 k 值及 V_d 值與水力停留時間的關係式如下：

高濃度

$$k=126.45 \times \text{HRT}^{-0.5648} \quad (7)$$

$$V_d=278.08 \times \text{HRT}^{-0.6819} \quad (8)$$

低濃度

$$k=289.68 \times \text{HRT}^{-0.6283} \quad (9)$$

$$V_d=64.007 \times \text{HRT}^{-0.2998} \quad (10)$$

若所使用的水源為自來水時，在高加氯量下，k 值大約在是 $2.12 \times 10^9 - 60.9 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ， V_d 值大約在是 $1.26 \times 10^9 - 16.5 \times 10^9 \text{ m/s}$ ；而在低加氯量時，k 值大約在是 $0.0 - 23.7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ， V_d 值大約在是 $1.54 \times 10^9 - 245 \times 10^9 \text{ m/s}$ 。今將 k 及 V_d 值對水力停留時間進行迴歸，可得到 k 值及 V_d 值與水力停留時間的關係式如下：

高濃度

$$k=133.47 \times \text{HRT}^{-0.5234} \quad (11)$$

$$V_d=32.637 \times \text{HRT}^{-0.2503} \quad (12)$$

低濃度

$$k=314.0 \times \text{HRT}^{-0.6278} \quad (13)$$

$$V_d=1208.6 \times \text{HRT}^{-0.8664} \quad (14)$$

若所使用的水源為去離子水時，在高加氯量下，k 值大約在是 $0.0 -$

$21.2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ， V_d 值大約在是 $4.69 \times 10^{-9} - 7.22 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ；而在低加氣量時， k 值大約在是 $0.0 - 21.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ， V_d 值大約在是 $4.72 \times 10^{-9} - 230 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。今將 k 及 V_d 值對水力停留時間進行迴歸，可得到 k 值及 V_d 值與水力停留時間的關係式如下：

高濃度

$$k = 12.749 \times \text{HRT}^{-0.2118} \quad (15)$$

$$V_d = 255.65 \times \text{HRT}^{-0.682} \quad (16)$$

低濃度

$$k = 158.4 \times \text{HRT}^{-0.543} \quad (17)$$

$$V_d = 627.56 \times \text{HRT}^{-0.7215} \quad (18)$$

而此結果與文獻中比較 (Biswas 1993， k 值大約在是 $6.4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ， V_d 值大約在是 $1.0 \times 10^{-7} - 220 \times 10^{-7} \text{ m/s}$) 發現 k 值均為 10^{-6} 左右，而在 V_d 值上，因文獻中的配水管線 (鑄鐵管) 與本試驗的 PVC 管線而有差異。由上面的討論可知，建立 k 值及各種管材 V_d 值的標準值，可做為日後設計、操作及監視輸送管線的參考依據。

陸、結論

綜合前面的試驗結果，獲得下列結論：

1. 在餘氣消耗率方面，除自由餘氣的消耗率比總餘氣快外，水力停留時間、加氣量、不同水源都會有影響。當水力停留時間愈長餘氣的消耗率愈大，而高加氣量的消耗率比低加氣量小。
2. 高加氣量的總餘氣最大消耗率發生在水力停留時間 1 天的地下水，其值為 0.16，即每公尺的消耗率約為 0.282%。
3. 由試驗結果發現，若進入配水管中的餘氣未達法規標準時，在低濃度及高消耗率下，將使管中的餘氣下降速率比預期大。故有效的控制最初加氣量，對配水系統而言相當重要。
4. 因彎管部分的延散數比較小，故彎管中的餘氣濃度會比彎管前的餘氣濃度稍為大一點；至於彎管後，因此處會形成一個小渦流而使餘氣不易進入，會使彎管後的餘氣濃度小於彎管中及彎管前的餘氣濃度。
5. 不論水力停留時間、最初加氣量、水源及孔穴的幾何狀為何，餘氣在孔穴的濃度均會快速下降。
6. 就加氣量而言，在淺孔穴中餘氣濃度的下降率不會隨餘氣濃度而有明顯變化，但在深孔穴中，則隨著餘氣濃度的上升其餘氣濃度的下降率會降低。另外，孔穴中的餘氣濃度和孔穴管型寬深比有明顯的關係，即深孔穴的餘氣濃度下降率恆比淺孔穴的餘氣濃度下降率大。

7. 若由不同的水源來討論，可發現不論是在直管、彎管或孔穴中，均是地下水及自來水的餘氯消耗率大於去離子水，而地下水及自來水的消耗率大小則無一定。
8. 不論水源及加氯量為何，餘氯在水中的消耗速率 k 值及餘氯在管壁的消耗速率 V_d 值，均隨水力停留時間的增加而漸減。
9. 就不同水源而言，不論在高或低加氯量下，自來水與地下水 k 值大小不一，而以去離子水最小；在 V_d 值大小方面，不同水源則無一定規則。

誌謝

本研究承蒙國科會經費補助 (NSC86-2211-E005-013)，特此誌謝。

符號說明

A_0	: 管線水質參數值 ($\pi L D Q^{-1}$)
A_1	: 管線水質參數值 ($k L U^{-1}$)
A_2	: 管線水質參數值 ($V_d r_0 D^{-1}$)
C	: 最終氯濃度, (mg / L)
C_0	: 最初氯濃度, (mg / L)
C^*	: 自由餘氯 ($\text{HOCl} + \text{OCl}^-$) 的濃度
D	: 餘氯在配水管中的延散係數
L	: 配水管總長
$f(r^*)$: 流況參數
	當層流時 $f(r^*) = 2 \left[1 - \left(\frac{r^*}{r_0^*} \right)^2 \right]$; 當混流時 $f(r^*) = 1$
k	: 反應速率, (1 / sec)
t	: 經過時間
Q	: 配水管之流量
U^*	: 平均流速
r_0^*	: 管的半徑
r^*	: 距管中心的徑向距離
x^*	: 距入流的軸向距離
V_d^*	: 餘氯於管壁上的消耗速率 (cm s^{-1})

參考文獻

Allen M. J., Taylor R. H., and Geldreich E.E., (1980) "The Occurrence of Microorganisms in Water Main Encrustations." *J.AWWA*, vol.72, no.11, p.614.

Costello James J.(1984) "Postprecipitation in distribution system ",*J.AWWA*, vol. 26, no.6, pp.47-49.

Geldreich E.E., Nash H.D.,Reasoner D.J., and Taylor R.H.,(1972) "The Necessity of Controlling Bacterial Populations in Potable Waters:Community Water Supply", *J.AWWA*,vol.64, no.9, p.596.

Lu,C.S. (1991) "Theoretical study of particle,chemical and Microbial Transport in drinking water distribution systems", Ph.D.Dissertation.

LeChevallier M.W., Cameron C.S. and McFETERS G.A. (1983)"New Medium for Improved Recovery of Coliform Bacteria from Drinking Water ", *Applied Environ. Microbial.*, Vol.54, No.2 pp.484-492.

Reasoner D.J. and Geldreich E.E., (1985) "A New Medium for the Enumeration and Subculture of Bacteria from Potable Water", *Applied Environ. Microbial.*, Vol.49, No.1 pp.1-7.

Sawyer & McCarty , 環境工程化學，乾泰出版社，民國 81 年。

中華民國台灣地區環境保護統計年報，行政院環境保護署，民國 85 年。

林建財、李志強、"配水管網中管末水質變化之初步探討"，第一屆給水技術研討會論文集，民國 73 年。

吳先琪，"自來水管材料之腐蝕及溶出物之研究"，台灣省自來水股份有限公司，民國 76 年。

高肇藩，衛生工程—給水篇，民國 69 年。

蔣本基，"飲用水中消毒副產物調查及處理技術之評估"，行政院環境保護署，民國 85 年。

簡志益，微粒在直管與對稱性孔穴中傳輸之研究，國立中興大學環境工程研究所碩士論文，民國 84 年 6 月。

台灣省自來水事業統計年報，台灣省自來水股份有限公司，第十六期，民國 82 年。

表 1 連續式試驗所使用的水源來源及水源水質

水 源	來 源				
	自來水司報告(原水)	自來水司報告(清水)	去離子水水質	地下水水質	自來水水質
地下水(GW)	台灣省台中市南區國光路 250 號國立中興大學地下所抽取				
自來水(FW)	台灣省台中市南區自來水管線中的水，取出後以硫代硫酸鈉去除水中餘氯。				
去離子水(DI)	試驗室自製				
濁度 (NTU)	0.67	0.64	0.10	0.22	0.29
臭度 (初嗅數)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
pH 值	6.50	7.40	6.04	6.37	6.36
硬度 (mg/L)	-	-	40.60	209.15	148.87
比電導度 (us/cm)	-	-	1.00	387.25	233.50
硫酸鹽 (mg/L)	22.90	13.80	N.D.	80.34	56.19
硝酸鹽氮 (mg/L)	0.26	0.14	0.44	0.65	0.57
有效餘氯 (mg/L)	0.00	0.80	0.03	0.04	0.15
DOC (ppm)	-	-	1.23	0.68	1.16
鐵 (mg/L)	0.06	0.03	0.00	0.03	0.00
錳 (mg/L)	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
天 膈 菌 數 (MPN/100ml)	15.10	0.00	0.00	0.00	0.00
總菌數 (CFU/ml)	23.00	0.00	2.1E+04	2.8E+04	2.0E+04

表 2 各水力停留時間下的餘氯消耗率

		高濃度		低濃度	
		總餘氯	自由餘氯	總餘氯	自由餘氯
1 天	地下水	16.0	22.5	24.5	27.7
	自來水	15.5	20.2	23.1	25.0
	去離子水	12.4	19.6	21.2	22.0
6 小時	地下水	4.8	6.0	11.9	12.7
	自來水	6.7	6.7	7.7	8.0
	去離子水	4.7	4.8	5.7	5.8
1 小時	地下水	3.1	4.2	6.9	8.9
	自來水	2.9	2.9	5.8	7.8
	去離子水	2.9	3.0	5.3	5.5
6 分鐘	地下水	1.0	1.0	3.7	3.8
	自來水	2.0	2.0	2.1	2.1
	去離子水	0.9	2.0	2.0	2.0

表 4 自來水流經孔穴時餘氯下降率

單位	%	孔穴	高濃度		低濃度	
			總餘氯	自由餘氯	總餘氯	自由餘氯
1 天	C12	C12	25.0	27.4	31.1	33.3
		C15	20.2	21.4	19.1	21.4
6 小時	C12	C12	23.0	23.5	26.0	31.1
		C15	15.2	16.7	18.4	19.2
1 小時	C12	C12	20.0	21.6	28.6	28.9
		C15	16.8	15.0	14.9	14.9
6 分鐘	C12	C12	16.0	17.0	21.7	22.2
		C15	11.9	14.3	17.4	18.6

表 3 地下水流經孔穴時餘氯下降率

單位	%	孔穴	高濃度		低濃度	
			總餘氯	自由餘氯	總餘氯	自由餘氯
1 天	C12	C12	28.0	28.9	30.0	32.4
		C15	22.5	18.	20.5	22.9
6 小時	C12	C12	22.0	22.9	26.4	30.0
		C15	16.0	15.8	18.5	18.4
1 小時	C12	C12	21.3	21.7	25.3	27.8
		C15	14.9	15.2	14.6	16.7
6 分鐘	C12	C12	18.3	19.6	21.4	23.6
		C15	11.4	14.7	13.5	14.8

表 5 去離子水流經孔穴時餘氯下降率

單位	%	孔穴	高濃度		低濃度	
			總餘氯	自由餘氯	總餘氯	自由餘氯
1 天	C12	C12	18.5	17.6	25.0	27.5
		C15	12.8	11.9	11.6	12.5
6 小時	C12	C12	17.5	16.7	24.5	26.0
		C15	12.8	12.9	12.0	12.5
1 小時	C12	C12	15.7	16.3	23.6	24.1
		C15	11.3	12.4	11.1	11.5
6 分鐘	C12	C12	14.4	15.3	20.0	20.8
		C15	10.3	10.5	11.9	11.1

表 6 各種試驗條件下的 k 值及 V_d 值

水力停留時間	加載量	地下水		自來水		去離子水	
		$k \cdot 10^{-6}$	$V_d \cdot 10^{-9}$	$k \cdot 10^{-6}$	$V_d \cdot 10^{-9}$	$k \cdot 10^{-6}$	$V_d \cdot 10^{-9}$
1 天	高濃度	2.7	3.13	2.12	1.26	1.28	0.54
	低濃度	5.0	7.38	3.21	1.54	4.09	5.85
6 小時	高濃度	2.9	1.27	5.79	10.5	2.88	2.64
	低濃度	3.72	8.90	8.04	13.3	3.86	4.72
1 小時	高濃度	12.5	15.2	11.5	14.0	5.95	9.64
	低濃度	21.1	25.9	23.7	29.0	21.5	26.3
6 分鐘	高濃度	57.4	124	60.9	16.5	0.00	115
	低濃度	114	32.7	0.00	245.0	0.00	230

單位： $k : s^{-1}$ $V_d : m/s$

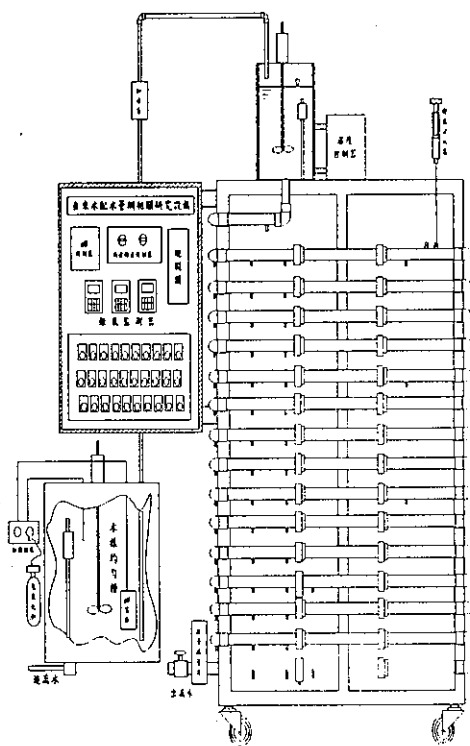


圖 1 連續式 PVC 管線試驗設備

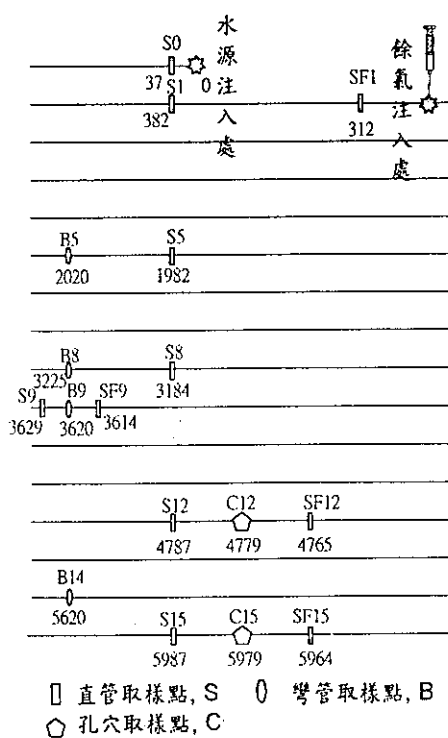


圖 2 PVC 管線試驗採樣點示意圖

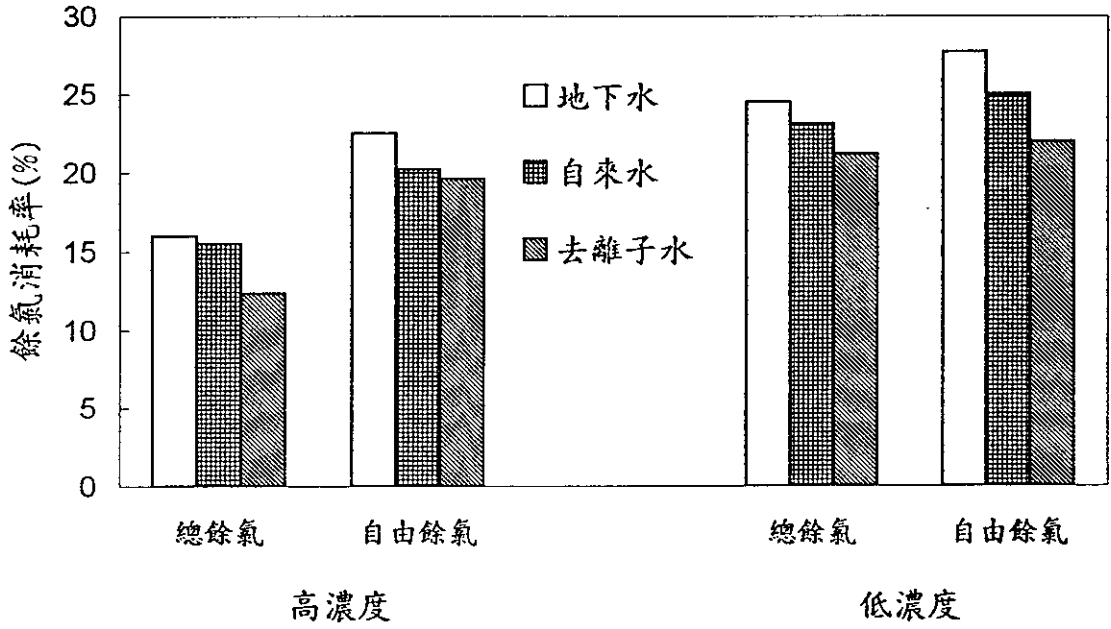


圖3 各種水源在水力停留時間1天的餘氯消耗率

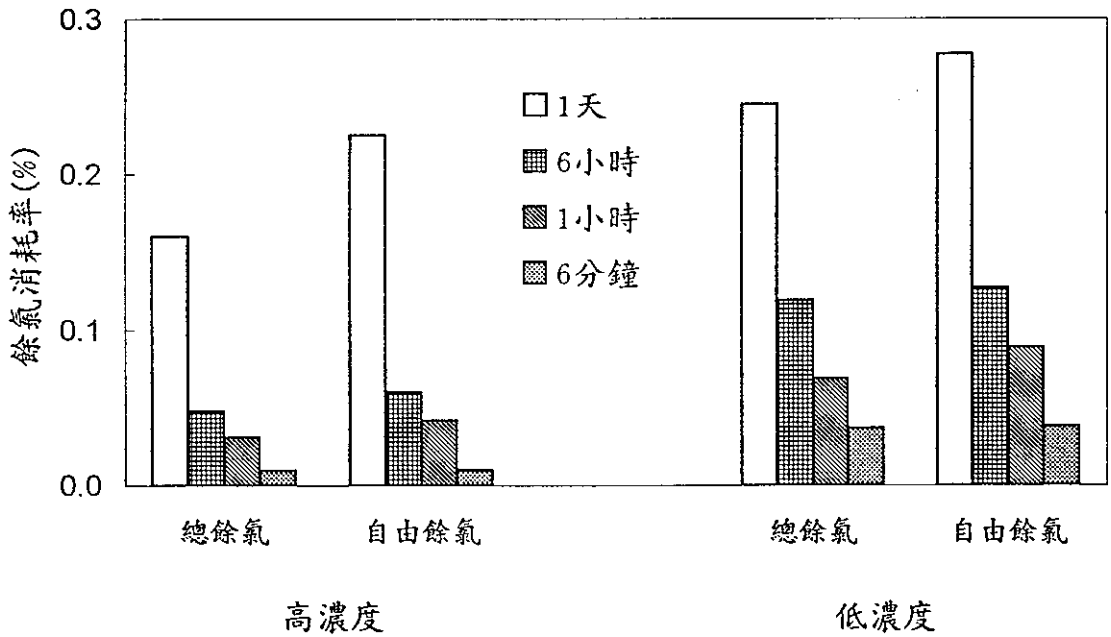


圖4 地下水源在高低加氯量下餘氯的消耗率

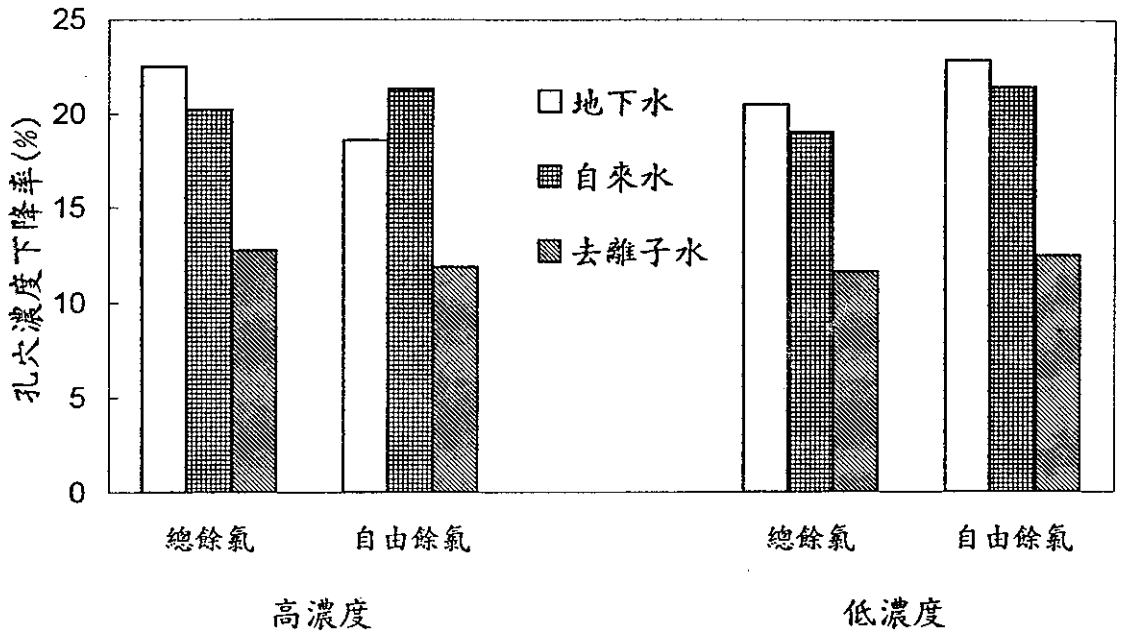


圖5 深孔穴中各種水源在水力停留時間1天的餘氯濃度下降率

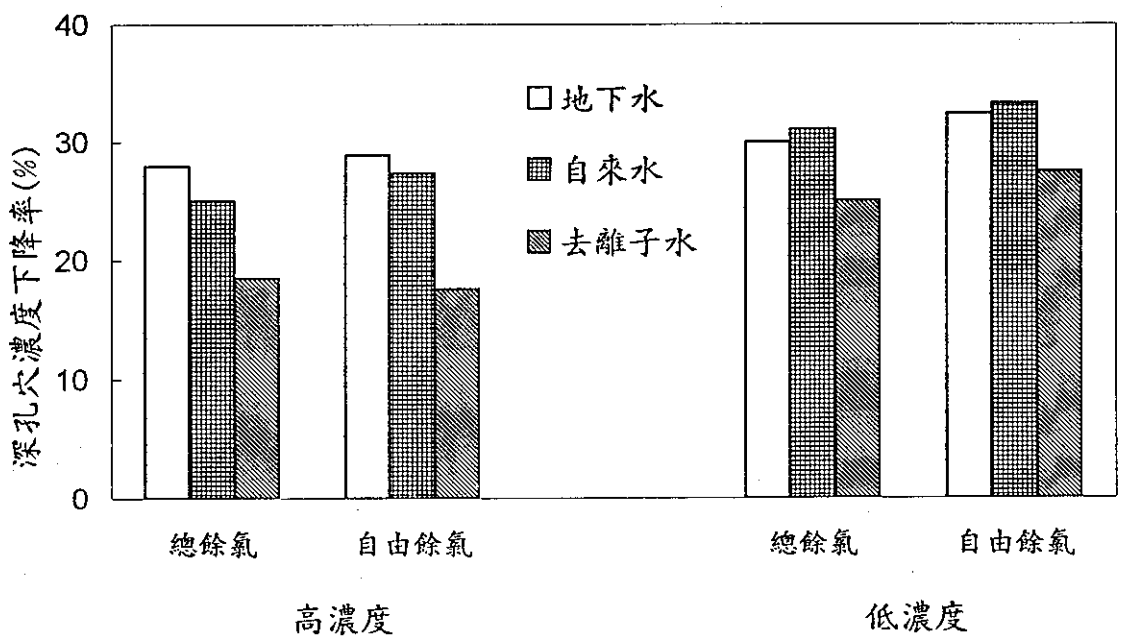


圖6 淺孔穴中各種水源在水力停留時間1天的餘氯濃度下降率

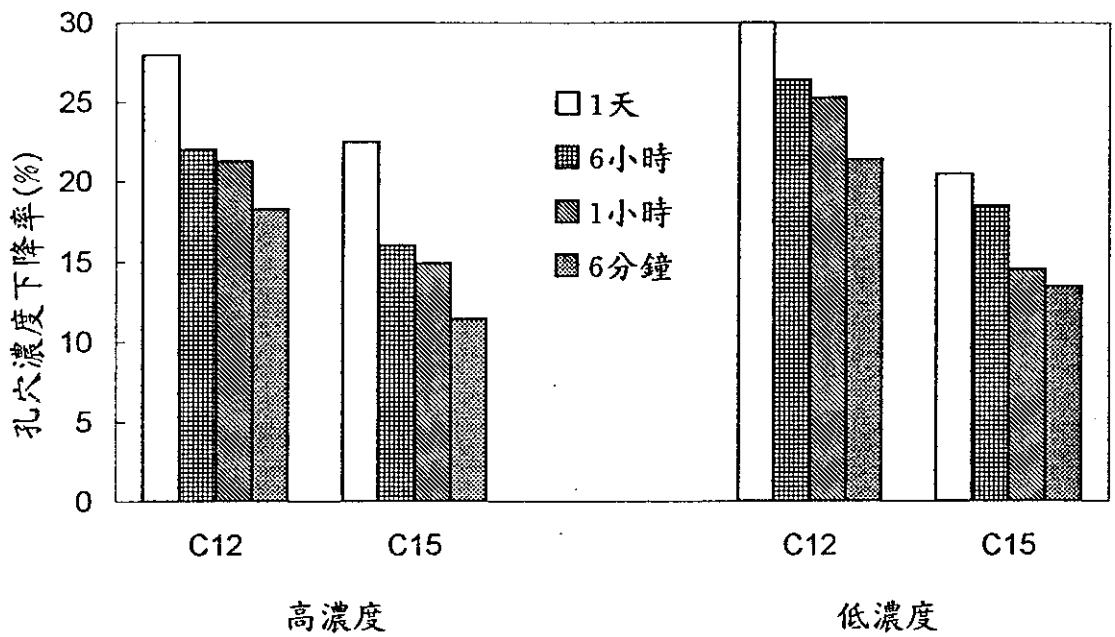


圖7 地下水在深淺孔穴中不同加氯量及水力停留時間下總餘氯的下降率

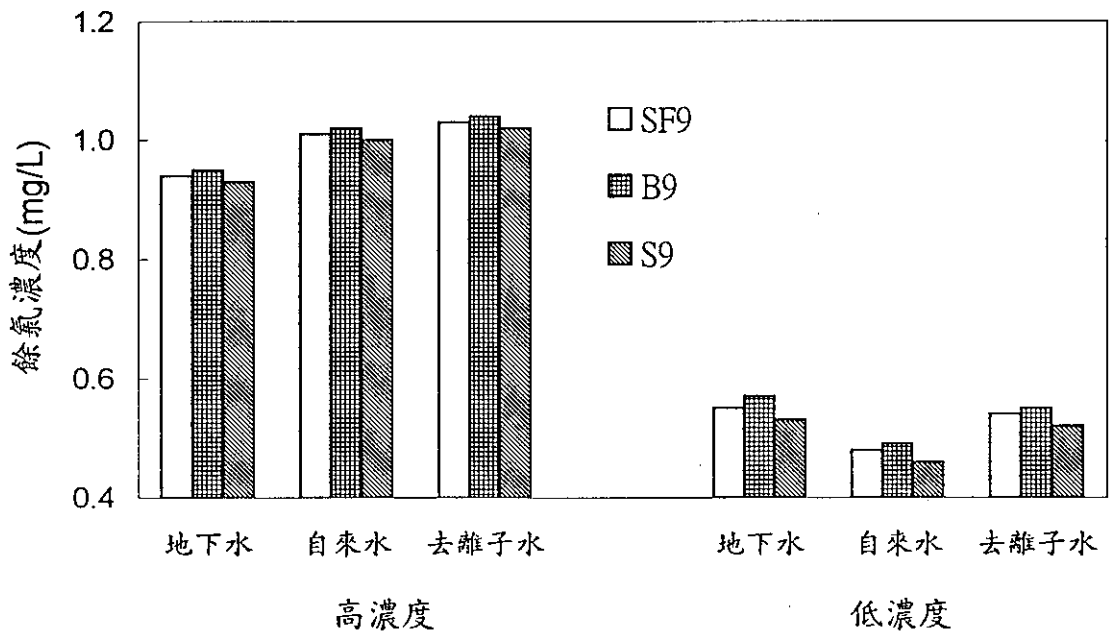


圖8 水力停留時間1小時下各種水源在彎管前後總餘氯濃度的變化