

Modeling subsidence hazard: puzzle, conceptual model and mechanism

**地層下陷災害模擬：
困惑、概念模式與機制**

Kuo-Chin Hsu

Department of Resources Engineering

National Cheng Kung University

國立成功大學資源工程學研究所

kchsu@mail.ncku.edu.tw

Acknowledgements



林伯龍（成大資源工程學研究所）
蔡明修（成大資源工程學研究所）
張志瑋（成大資源工程學研究所）
蔡文瀚（成大資源工程學研究所）
蔡東霖（嘉義大學土木與水資源工程學系）
王士榮（財團法人中興工程顧問社）
丁崇峰（成大水工試驗所）
林政偉（成大水工試驗所）
洪偉嘉（綠環境科技有限公司）

Georesources: solid, fluid and energy



www.lihpao.com



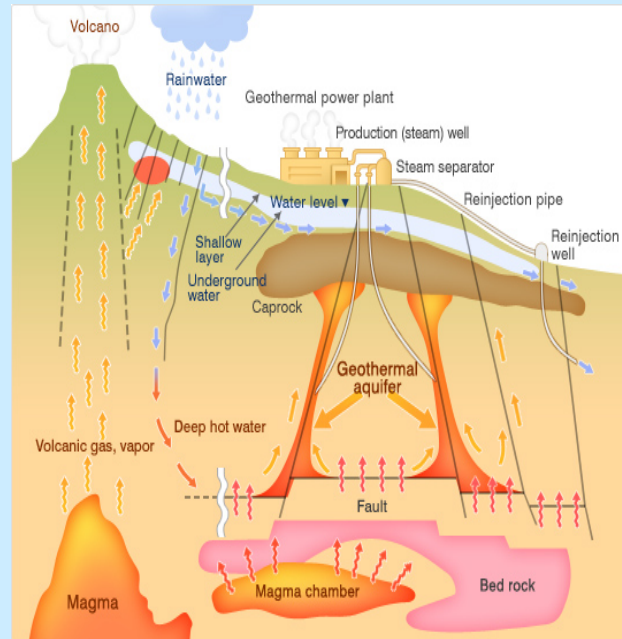
www.taopic.com



shiyou.baik.com



www.steamboattoday.com



www.mhi-global.com

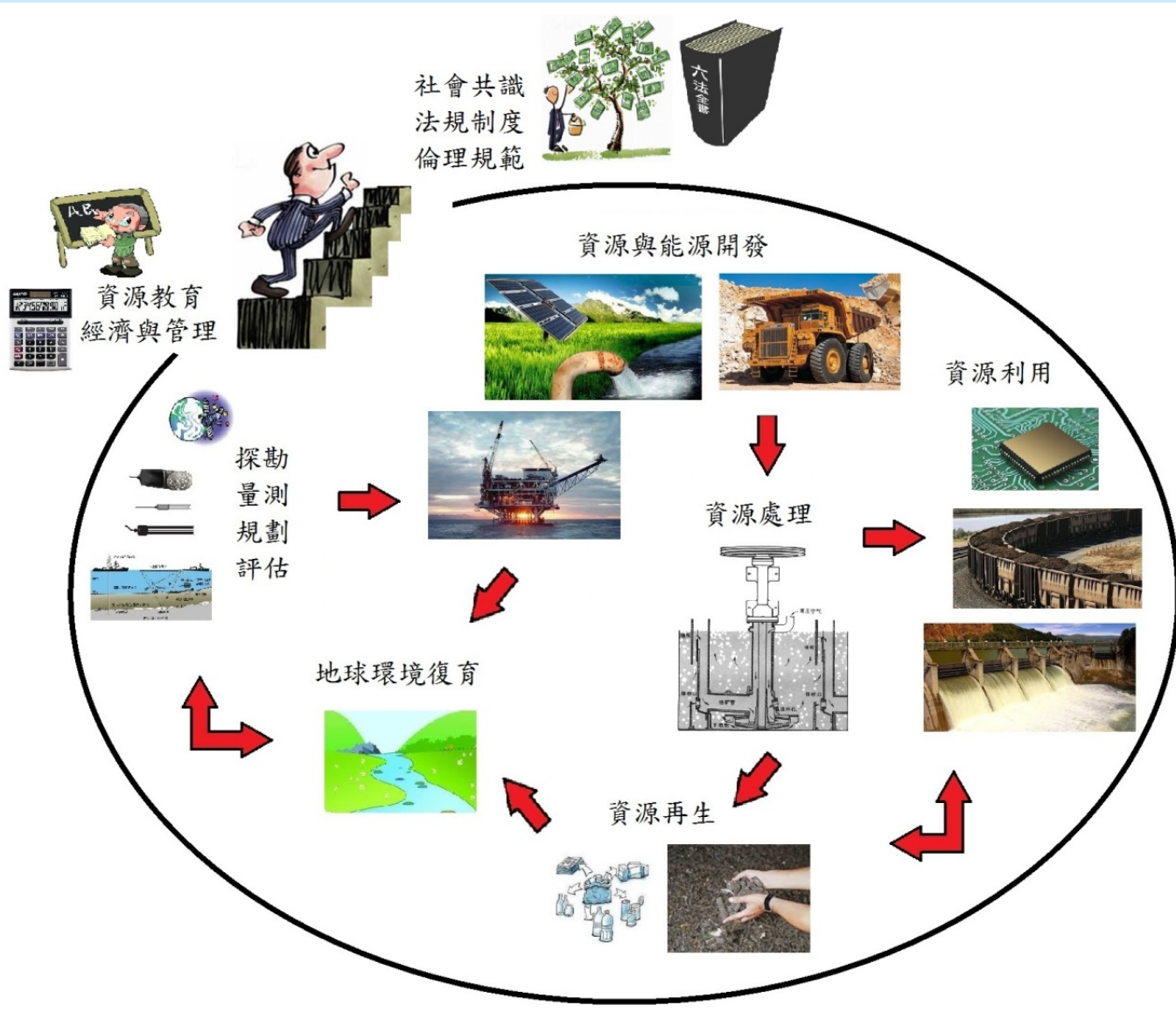


www.1688.com.au



國立成功大學
National Cheng Kung University

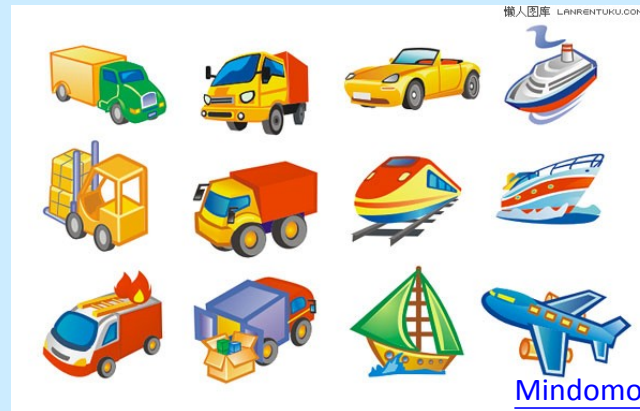
資源工程學研究所 (人、環境、資源與文明)



Why do we need geological resources?



KeywordSuggest.org



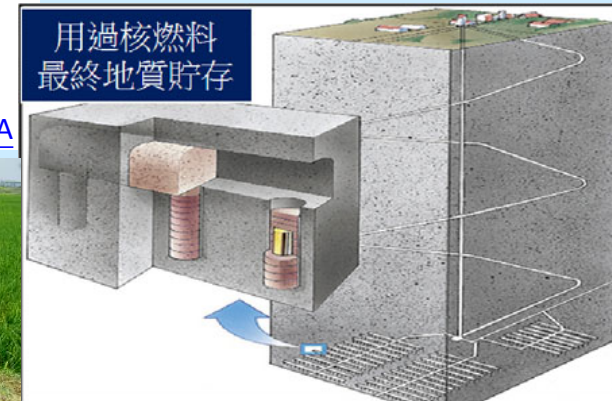
icebunny3849.pixnet.net



www.pep.com.cn



www.livemint.com



anuclear-safety.twenergy.org.tw

Pandora's box or Aladdin's lamp?



www.insanelymac.com



blog.people.com.cn

www.dreamstime.com-



www.123rf.com-

pixabay.com



LHS 1140b星球，年齡至少50億年，
距離太陽39光年，地球的7倍，
星球內部可能是由鐵所組成，
地表可能有液態水。(2017-4-20)
TruerVine



www.tudou.com



komicolle.org



Geology IN



www.culture.ntpc.gov.tw

What is subsidence?

- Land subsidence is the motion of Earth's surface as it shifts downward relative to a datum.



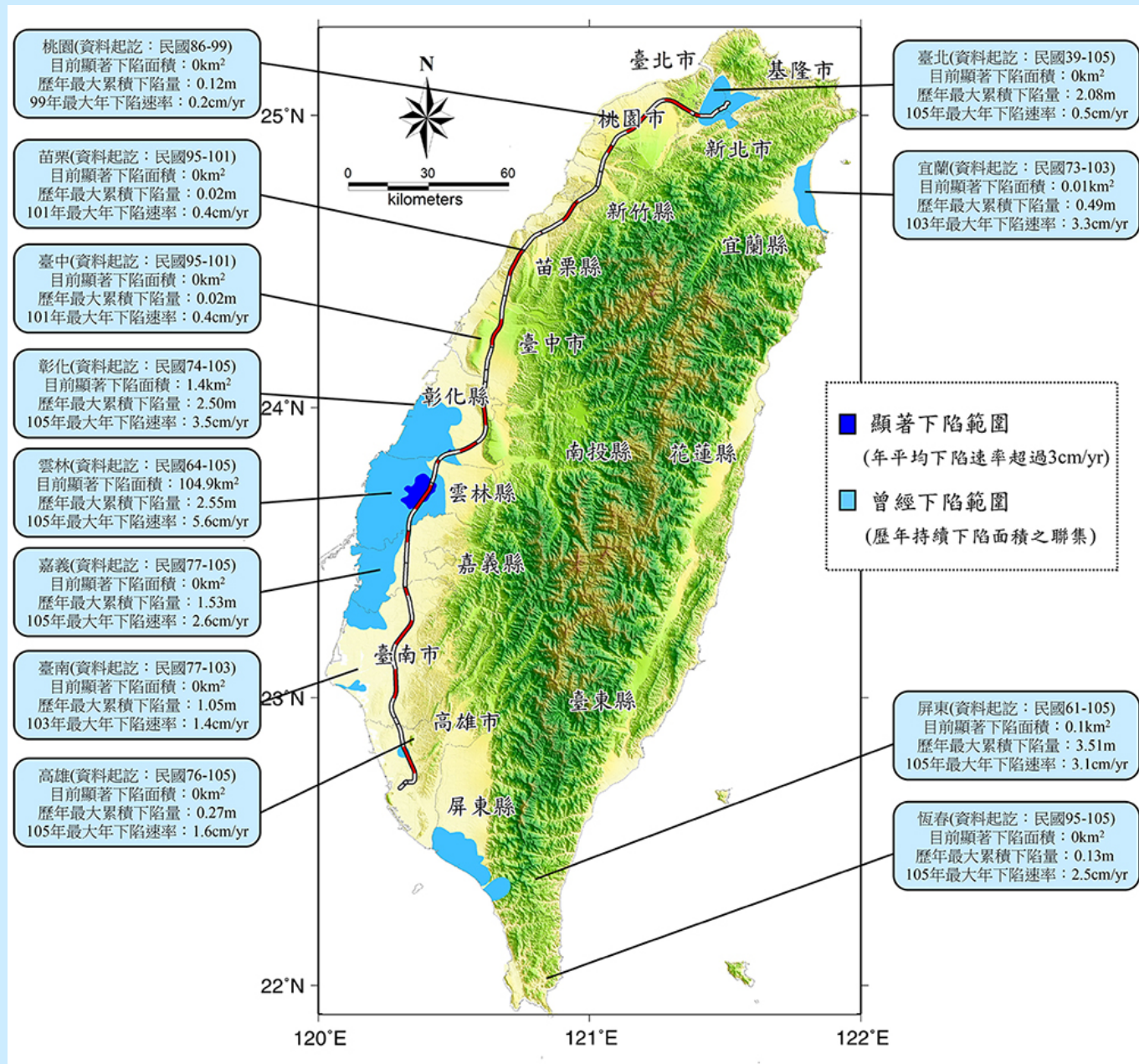


What causes subsidence?

- Subsidence is caused naturally
 - dissolution of limestone in karst terrains
 - change of geological structure caused by volcano eruption
 - earthquake
 - faulting activity
- Subsidence is caused anthropogenically.
 - collapse of abandoned mine
 - deformation of soil structure caused by surface or underground construction
 - extraction of the subsurface fluid such as water, gas and oil

Subsidence in Taiwan

(水利署網站, 2016)



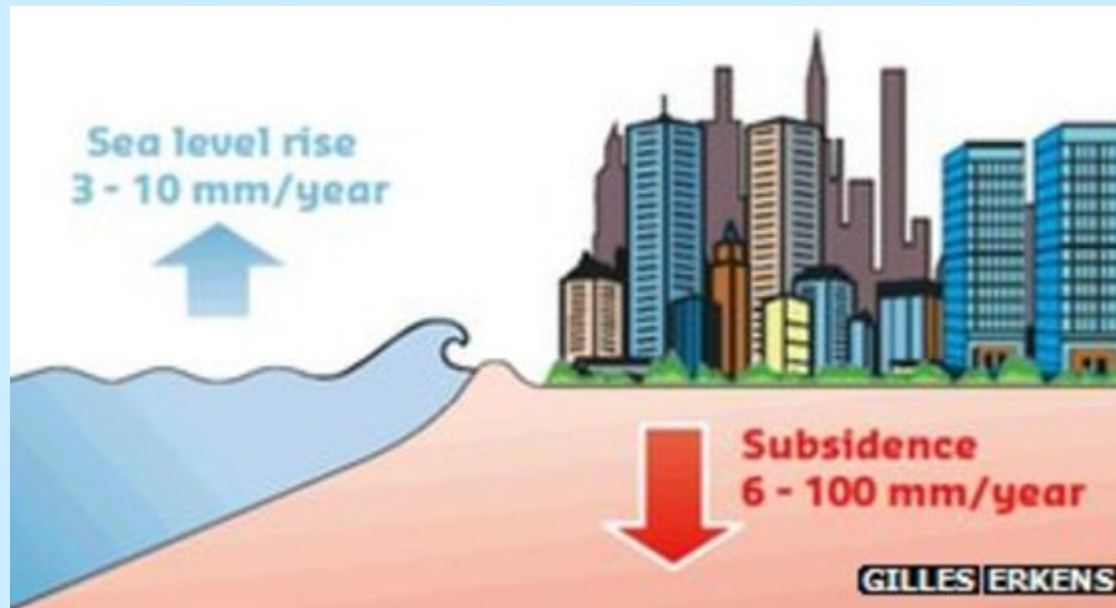
Subsidence is worldwide

世界上嚴重地層下陷地區名稱	累積最大下陷量(公尺)	下陷面積(平方公里)	發生時間	臺灣各地層下陷地區名稱	累積最大下陷量(公尺)	下陷面積(平方公里)	資料期距
				臺北	2.24	252	1955~1999
日本東京	4	190	1920~1970+	宜蘭	0.28	170	1984~1999
日本大阪	3	190	1928~1968	彰化	1.85	610	1975~1999
墨西哥墨西哥市	9	130	1938~1970+	雲林	2.02	880	1975~1999
美西亞歷桑那中部	2.3	130	1961~1969+	嘉義	1.16	250	1987~1998
美國加州 Santa Clara 谷	4	650	1920~1970	臺南	0.63	30	1988~1999
美國 San Joaquin 谷	2.9~9	11,000	1935~1970+	高雄	0.38	10	1992~1998
美國拉斯維加斯	1	500	1935~1963	屏東	3.09	201	1972~1998

經濟部水利處, 2000

Subsidence associated with climate change

- More than 1 out of every 100 people on the planet live less than 1 meter above sea level.





The land subsidence has accompanied ...

- seawater encroachment,
- inundation,
- soil salinity,
- damage of infrastructure,
- reduction of fresh water supply,
- serious property damage and economic loss

The subsidence rate

(Water Resources Agency, 2016)

表 4.3-4 彰化地區民國 81 年至 105 年下陷面積分析表

觀測期距	81.10 ~ 82.8	82.8 ~ 84.8	84.8 ~ 86.8	86.8 ~ 87.8	87.8 ~ 89.6	89.0 ~ 90.8	90.8 ~ 92.8	92.8 ~ 93.8	93.8 ~ 94.5	94.5 ~ 95.10	95.10 ~ 96.7	96.7 ~ 97.6	97.6 ~ 98.7	98.7 ~ 99.6	99.6 ~ 100.6	100.6 ~ 101.6	101.6 ~ 102.6	102.6 ~ 103.6	103.6 ~ 104.6	104.6 ~ 105.6
最大下陷速率 (公分/年)	17.1	21.7	23.6	19.3	16.4	17.6	10.4	14.2	11.0	8.9	8.4	6.4	5.7	6.4	5.3	6.4	3.8	3.4	4.1	3.5
最大下陷速率 發生地點	大城鄉	大城鄉	大城鄉	大城鄉	大城鄉	大城鄉	大城鄉	溪湖鎮	溪湖鎮	溪湖鎮	二林鎮	二林鎮	溪州鄉	溪州鄉	溪湖鎮	溪州鄉	溪州鄉	溪州鄉	溪州鄉	溪州鄉
速率超過 2 公分/年之 面積(平方公里)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.2	177.2	12.4
速率超過 3 公分/年之 面積(平方公里)	59.9	195.9	257.6	392.0	321.6	408.0	357.3	368.1	263.4	278.3	225.6	213.7	78.1	138.9	51.4	80.0	2.1	1.5	25.8	1.4

表 4.3-12 雲林地區民國 81 年至 105 年下陷面積分析表

觀測期距	81.8 ~ 83.10	83.10 ~ 85.10	85.10 ~ 87.2	87.2 ~ 88.11	88.11 ~ 91.4	91.4 ~ 92.4	92.4 ~ 94.5	94.5 ~ 95.10	95.10 ~ 96.7	96.7 ~ 97.5	97.5 ~ 98.6	98.6 ~ 99.5	99.5 ~ 100.5	100.5 ~ 101.5	101.5 ~ 102.6	102.6 ~ 103.5	103.5 ~ 104.5	104.5 ~ 105.5
最大下陷速率 (公分/年)	16	8	8	7	9.5	12.2	11.6	10.1	8.2	7.1	7.4	6.4	6.8	6.5	4.5	6.1	7.1	5.6
最大下陷速率 發生地點	麥寮鄉	麥寮鄉	麥寮鄉	元長鄉	土庫鎮	褒忠鄉	元長鄉	元長鄉	虎尾鎮	元長鄉	虎尾鎮	土庫鎮	虎尾鎮	虎尾鎮	虎尾鎮	元長鄉	土庫鎮	土庫鎮
速率超過 2 公分/年之 面積(平方公里)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	451.1	815.1	240.1
速率超過 3 公分/年之 面積(平方公里)	782.7	745.7	392.0	366.1	610.5	703.1	678.6	557.1	551.5	580.7	413.9	267.1	397.6	155.4	106.4	307.6	658.6	104.9

表 4.3-15 屏東地區民國 83 年至 105 年下陷面積分析表

觀測期距	83.04~ 84.04	84.04~ 86.04	86.04~ 87.03	87.03~ 90.05	90.03~ 93.04	93.05~ 95.12	95.12~ 98.02	98.02~ 99.08	99.08~ 100.08	100.08~ 101.08	101.08~ 102.08	102.08~ 103.08	103.08~ 104.08	104.08~ 105.08
最大下陷速率 (公分/年)	12.7	9.0	4.9	4.3	4.0	2.8	3.3	4.3	6.8	1.9	3.9	4.7	5.1	3.1
最大下陷速率 發生地點	枋寮鄉	枋寮鄉	南州鄉	林邊鄉	林邊鄉	佳冬鄉	恆春鎮	林邊鄉	佳冬鄉	林邊鄉	佳冬鄉	佳冬鄉	佳冬鄉	佳冬鄉
速率超過2公分/年 之面積(平方公里)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51.2	99.7	48.0
速率超過(3公分/年) 之面積(平方公里)	143.5	136.7	32.7	4.9	7.4	0.0	2.5	47.5	48.9	0.0	4.1	17.6	44.5	0.1

Should we care for fresh water resources?



- 台灣累積地層下陷面積約佔台灣平原地區面積的二成2403 Km²

- 最大下陷量

屏東 3.51 m

雲林 2.55 m

彰化 2.50 m

- 曾文水庫2017有效蓄水量 $0.46 \times 10^9 \text{ m}^3$
- 平均下陷 0.1m (100mm)=0.52座曾文水庫
- 平均下陷 0.5m (500mm)=2.6座曾文水庫
- 平均下陷 1m (1000mm)=5.2座曾文水庫

新雨量分級 與 警戒事項 之關聯		
104年9月1日起正式實施		
名稱	雨量	警戒事項
大雨	80mm/24h以上 或 40mm/h以上	山區：可能發生山洪暴發、落石、坍方。 平地：排水差或低窪地區易發生積淹水。 雨區：強陣風、雷擊。
豪雨	200mm/24h以上 或 100mm/3h以上	山區：山洪暴發、落石、坍方、土石流。 平地：易發生積淹水。 雨區：強陣風、雷擊、甚至冰雹。
	大豪雨 350mm/24h以上	山區：山洪暴發、落石、坍方、土石流、崩塌。 平地：積淹水面積擴大，河川中下游防河水溢淹。 雨區：強陣風、雷擊、甚至冰雹。
	超大豪雨 500mm/24h以上	山區：大規模山洪暴發、落石、坍方、土石流、崩塌。 平地：易有大範圍積淹水。 雨區：強陣風、雷擊、甚至冰雹。
※ 對未達特報之連續性降雨或未能事先掌握的突發性降雨，在研判有致災之虞時，中央氣象局將輔以天氣即時訊息方式發布。		
※ 因各地對雨量承受度不同，致災性也會不同，使用上應瞭解所在位置之環境特徵。		

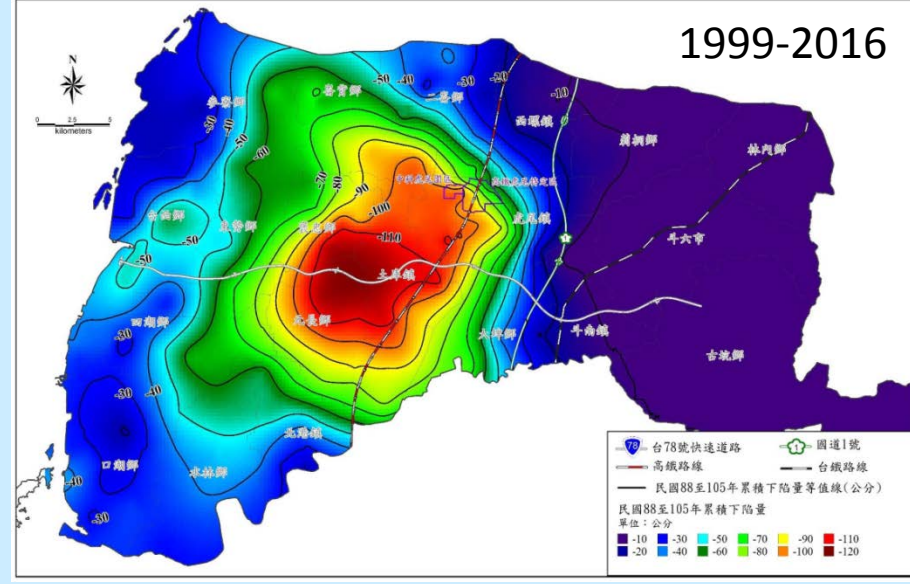
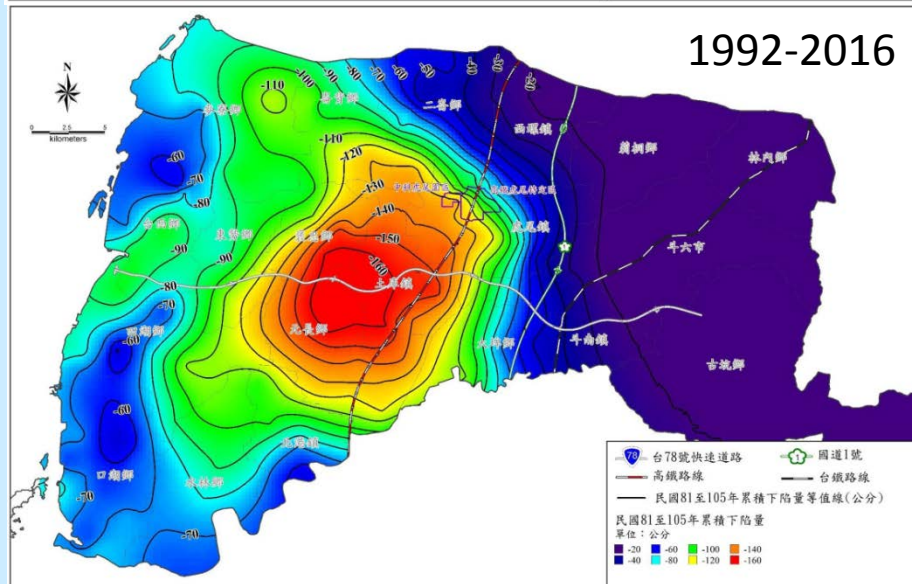
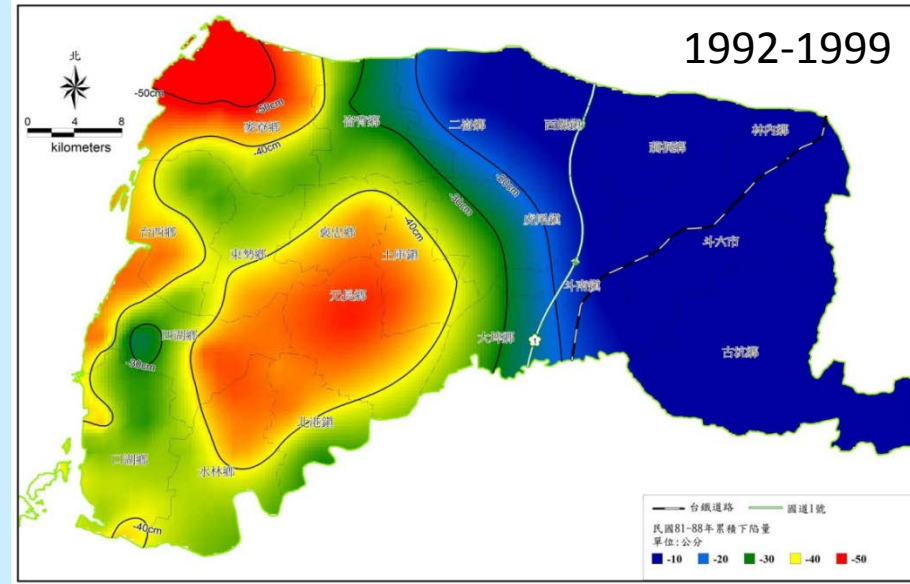
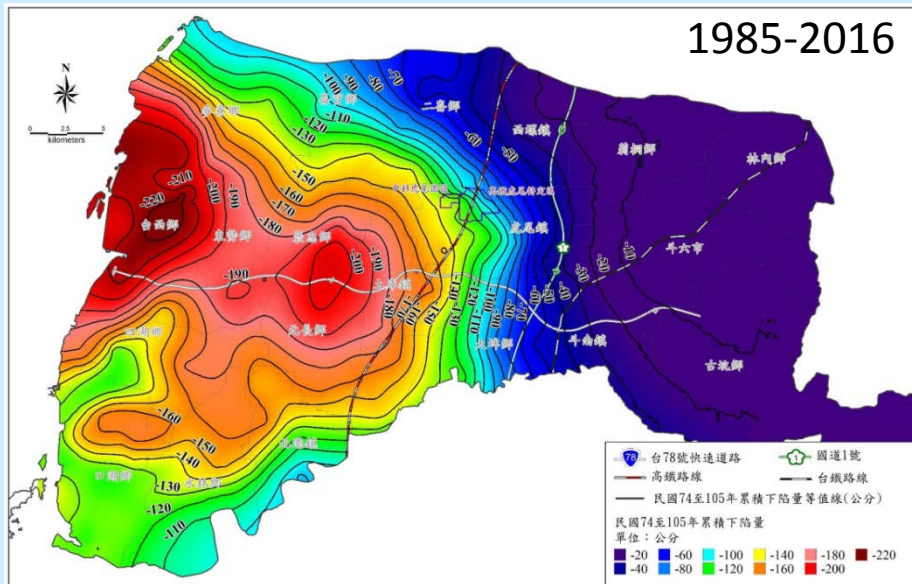
CWB web



Should we care for food-water security?

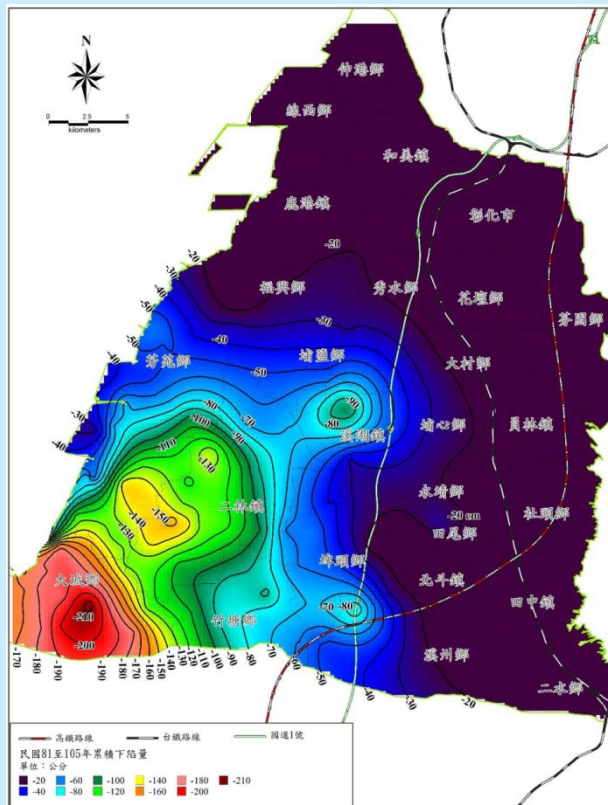
- 台灣耕地面積逐年減少，糧食自給率大約只有30%
- 台灣累積地層下陷的面積約佔台灣平原地區面積的二成，2403平方公里(約240000公頃)
- 聯合國資料一公頃土地種稻一年可以養活十九人(約20人)
- 一人一天食物150元，一年約7.3萬
- 一年地層下陷地區產值 $240000 \times 20 \times 7.3 = 3500$ 億
(比較1992年1670億元採購幻象戰機，2009考慮封存(自由時報2009/10/23))
- 十年產值3兆5千億 永續經營一百年35兆

Subsidence in Yunlin

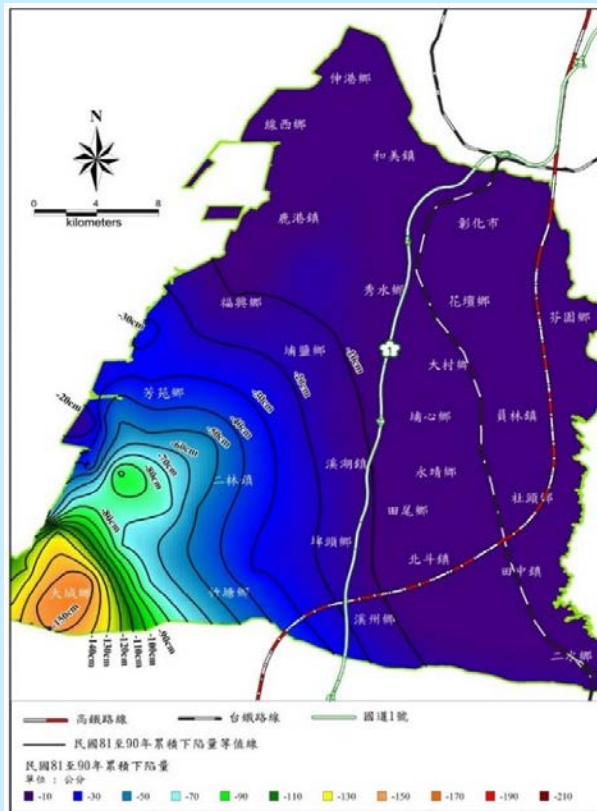


(Water Resources Agency, 2016)

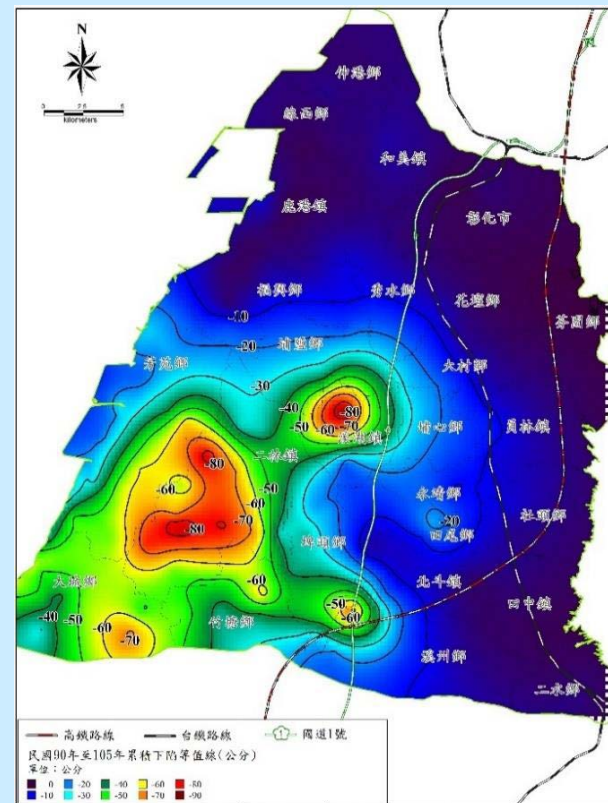
Subsidence in Changhua



1992-2016

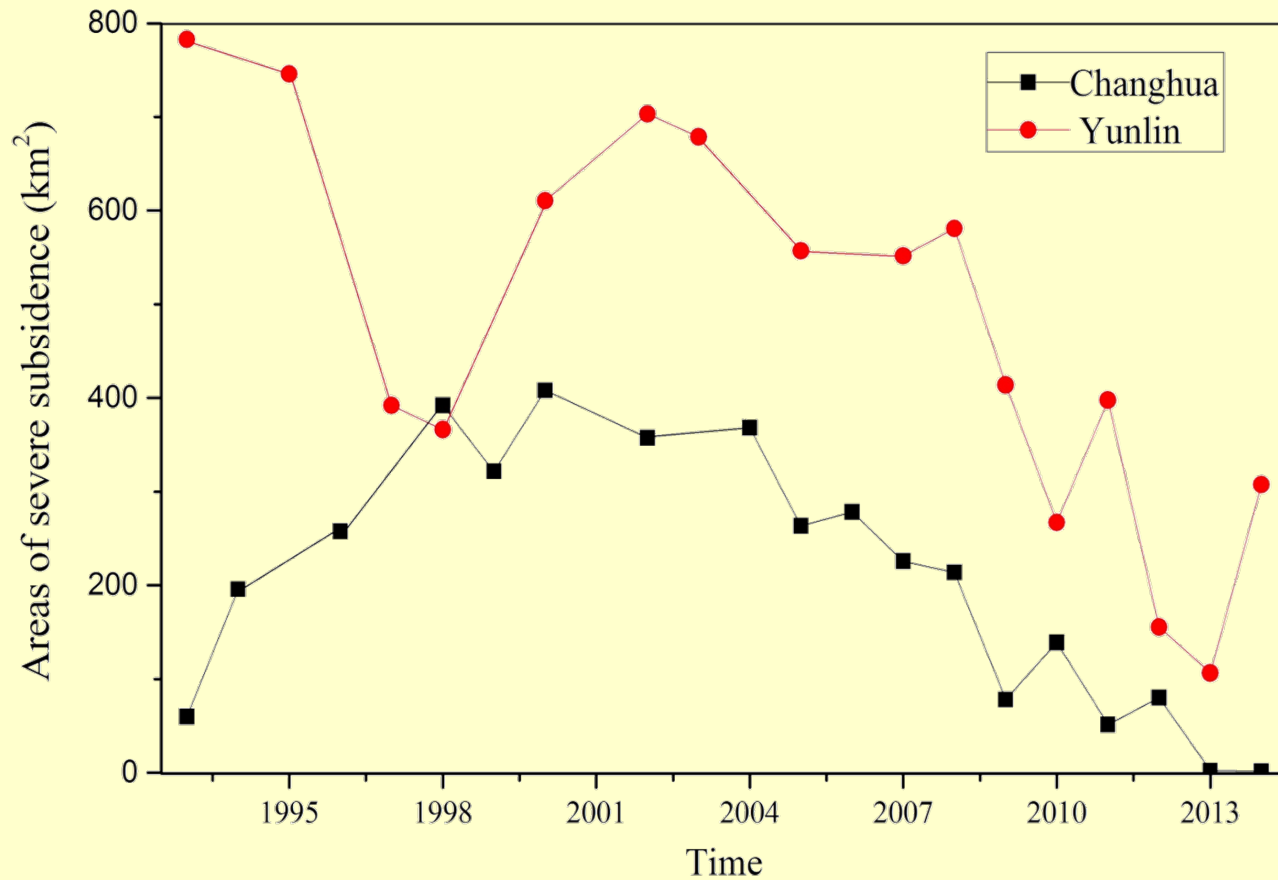


1992-2001



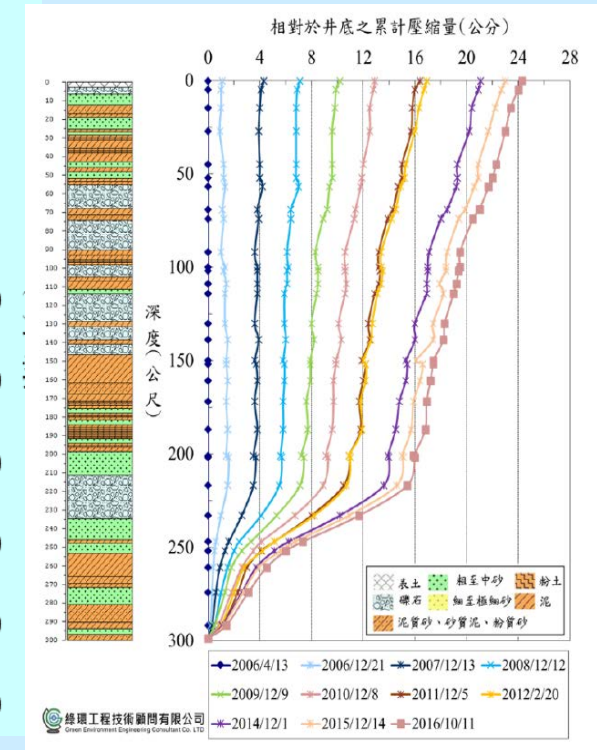
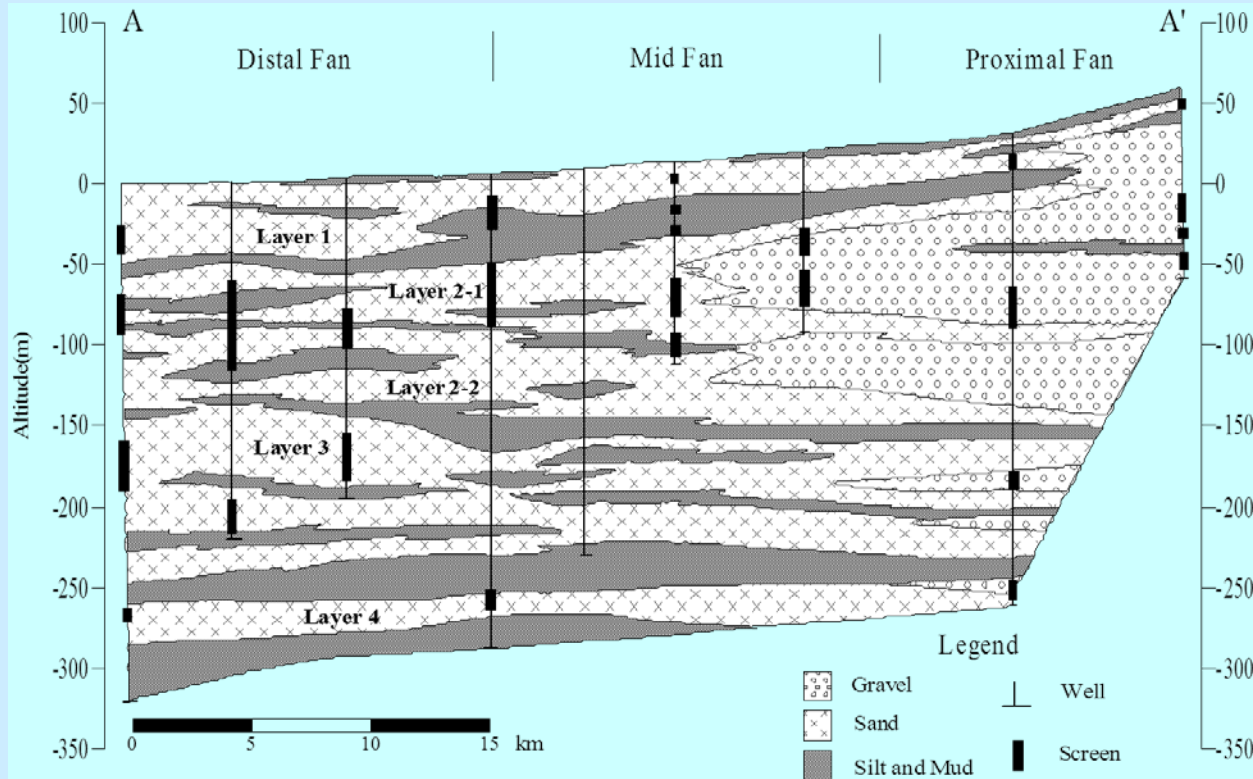
2001-2016

Subsidence in Chousui river alluvial fan



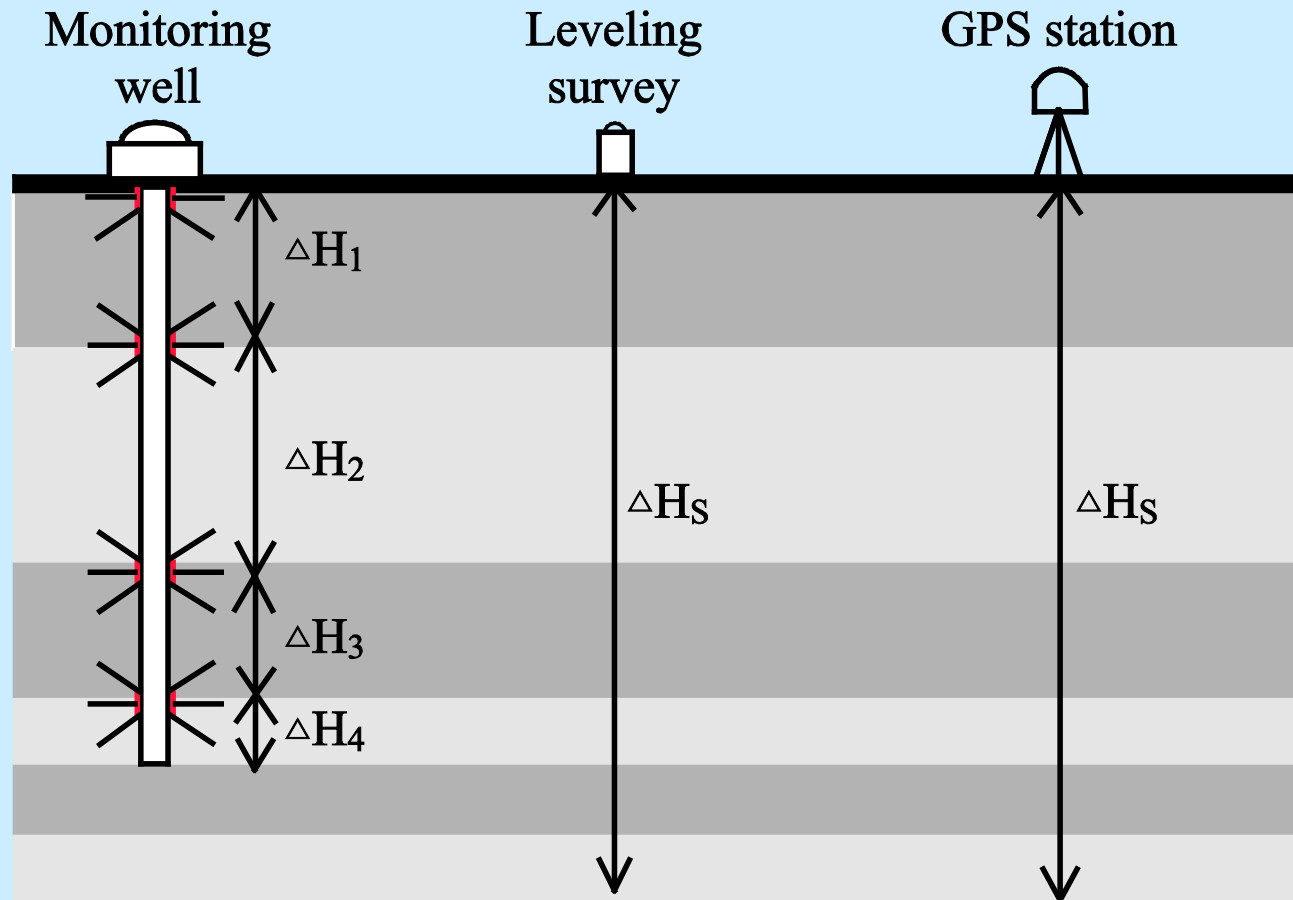
(Water Resources Agency, 2015)

Hydrogeology of Chousui river alluvial fan (CSRAAF)

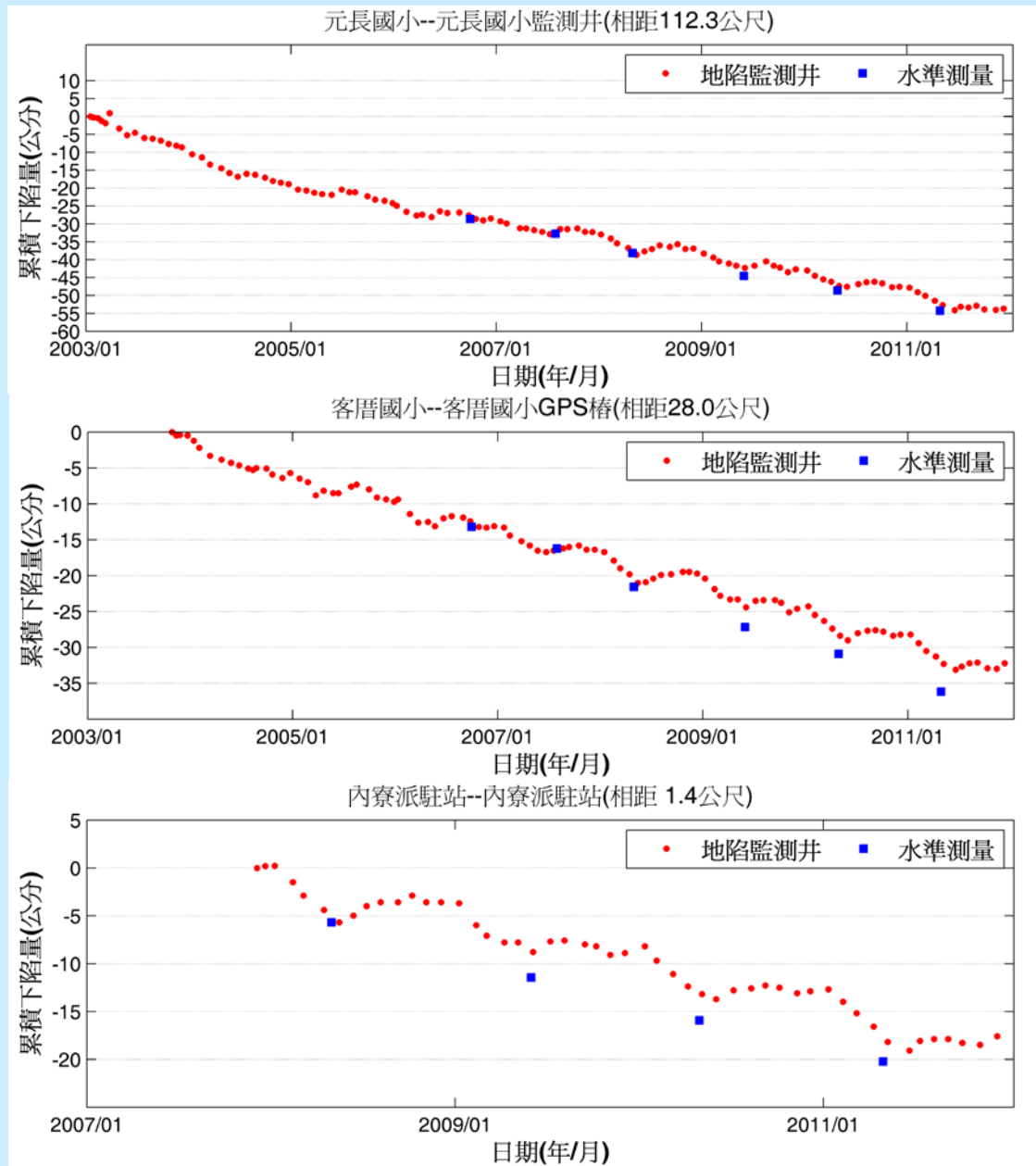


(Water Resources Agency, 2016)

Subsidence monitoring system



Subsidence in deeper layer?



Which layer contributes the subsidence?

	Thickness (m)	Compaction (cm)	Contribution to total compaction (%)
Aquifer 1	59.9	5.10	17.18
Aquitard 1	10	1.03	3.46
Aquifer 2-1	3	0.34	1.15
Aquitard 2	4	0.45	1.53
Aquifer 2-2	69.9	11.94	40.2
Aquitard 3	20	2.41	8.11
Aquifer 3	36	8.43	28.37

Subsidence at 1995-2014

Water use in CSRAF

- 濁水溪：台灣最長河流，水資源最豐富。
- 1719施世榜修築八堡圳，引濁水溪，灌溉彰化，南北岸不均衡發展，彰化平原成為台灣最重要穀倉。
- 1760蔴仔埤圳
- 1924濁幹線。
- 1927武界引水至日月潭，發電後灌溉。
- 1937『二十六年分水協定書』
- 1955斗六大圳。
- 1959台糖、水利會共同開發雲林地下水。糧食局也呼籲農民開發地下水。發生井干擾糾紛。
- 1970養殖漁業興起，1978魚塭面積激增，大量抽用地下水。
- 1998地調所完成濁水溪沖積扇水文地質調查研究建立地下水觀測網
- 2001集集共同引水工程，期望解決南北兩岸分水、爭水爭議以及地下水超抽引致地層下陷，與確保六輕用水。
- 2002-2009農業平均用水17億噸/年，工業用水量平均1.1億噸/年，農業支援工業用水1.2億噸/年。
- 為免受地表水榮枯影響，及圳水草籽、福壽螺卵管理困擾，農民仍多用地下水。
- 2012高鐵沿線禁抽地下水，農委會推黃金廊道，78號快速道路移土方。
- 2014湖山水庫大壩竣工，提供公共給水。
- 2016調查雲彰地區有卅一萬口水井，彰化平均每八人就有一口井；雲林更嚴重，平均每四人就有一口井。

Puzzles about the subsidence

- Why aquifer subside more?
- Who is responsible for the subsidence?
 - Deep water users or shallow water users?
 - Users in distal fan or in the mid fan?
- Why not uniformly subside?
- So what for the subsidence?

1-D Stochastic poroelastic model

$$a^{-1} \frac{\partial^2 \langle w(z,t) \rangle}{\partial z^2} - \alpha \frac{\partial \langle P(z,t) \rangle}{\partial z} = 0$$

$$\alpha \frac{\partial^2 \langle w(z,t) \rangle}{\partial t \partial z} + Q^{-1} \frac{\partial \langle P(z,t) \rangle}{\partial t} - \kappa_G \frac{\partial^2 \langle P(z,t) \rangle}{\partial z^2} = 0$$

$$a^{-1} \frac{\partial^2 C_{Yw}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z^2} - \alpha \frac{\partial C_{YP}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z} = 0$$

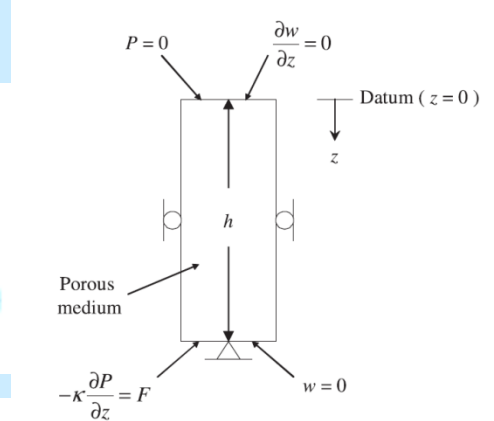
$$\alpha \frac{\partial^2 C_{Yw}(z,t;Z,\tau)}{\partial \tau \partial Z} + Q^{-1} \frac{\partial C_{YP}(z,t;Z,\tau)}{\partial \tau} - \kappa_G \frac{\partial^2 C_{YP}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z^2} - \kappa_G \frac{\partial}{\partial Z} \left[C_{YY}(z,t;Z,\tau) \frac{\partial \langle P(Z,\tau) \rangle}{\partial Z} \right] = 0$$

$$a^{-1} \frac{\partial^2 C_{wP}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z^2} - \alpha \frac{\partial C_{PP}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z} = 0$$

$$\alpha \frac{\partial^2 C_{wP}(z,t;Z,\tau)}{\partial t \partial Z} + Q^{-1} \frac{\partial C_{PP}(z,t;Z,\tau)}{\partial t} - \kappa_G \frac{\partial^2 C_{PP}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z^2} - \kappa_G \frac{\partial}{\partial Z} \left[C_{YP}(z,t;Z,\tau) \frac{\partial \langle P(z,t) \rangle}{\partial z} \right] = 0$$

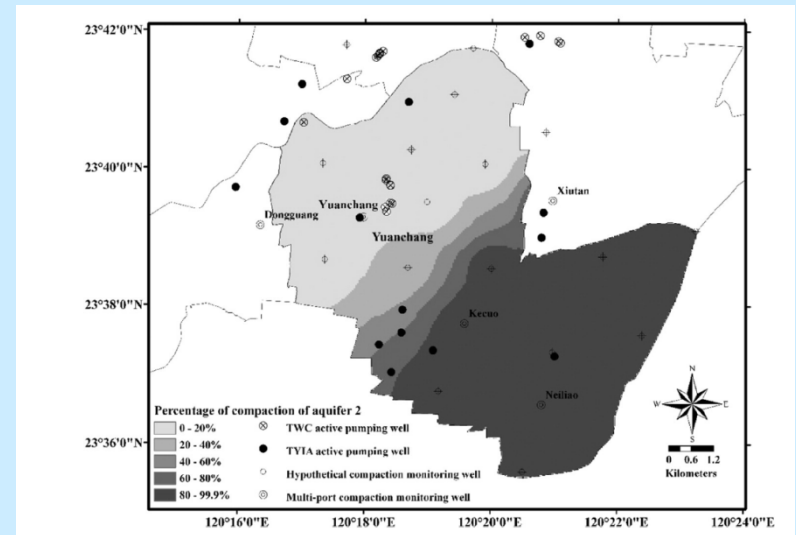
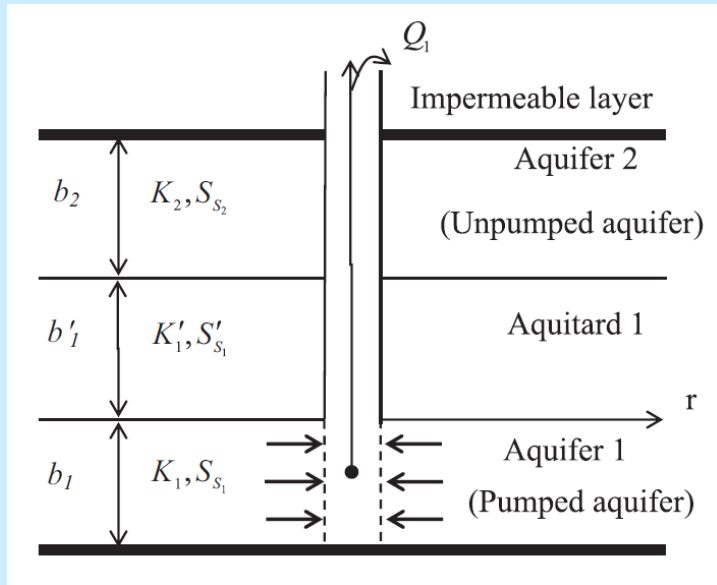
$$a^{-1} \frac{\partial^2 C_{ww}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z^2} - \alpha \frac{\partial C_{Pw}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z} = 0$$

$$\alpha \frac{\partial^2 C_{ww}(z,t;Z,\tau)}{\partial t \partial Z} + Q^{-1} \frac{\partial C_{Pw}(z,t;Z,\tau)}{\partial t} - \kappa_G \frac{\partial^2 C_{Pw}(z,t;Z,\tau)}{\partial Z^2} - \kappa_G \frac{\partial}{\partial Z} \left[C_{Yw}(z,t;Z,\tau) \frac{\partial \langle P(z,t) \rangle}{\partial z} \right] = 0$$

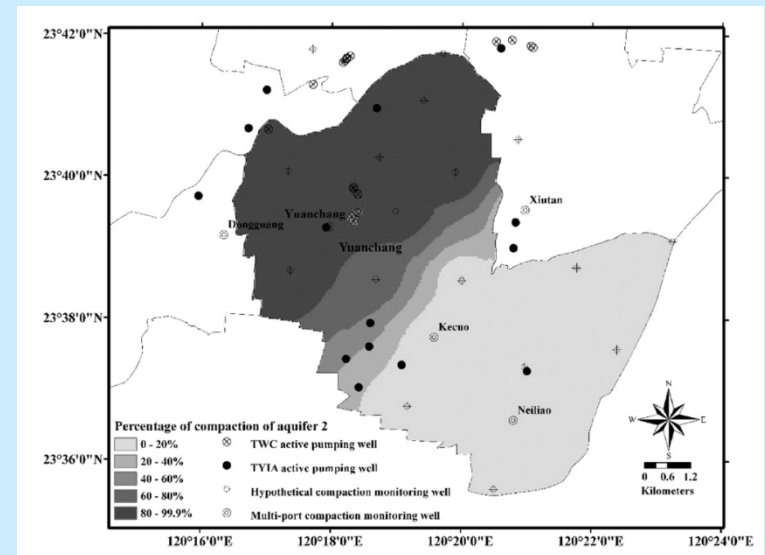


(Wang and Hsu, 2009, 2013)

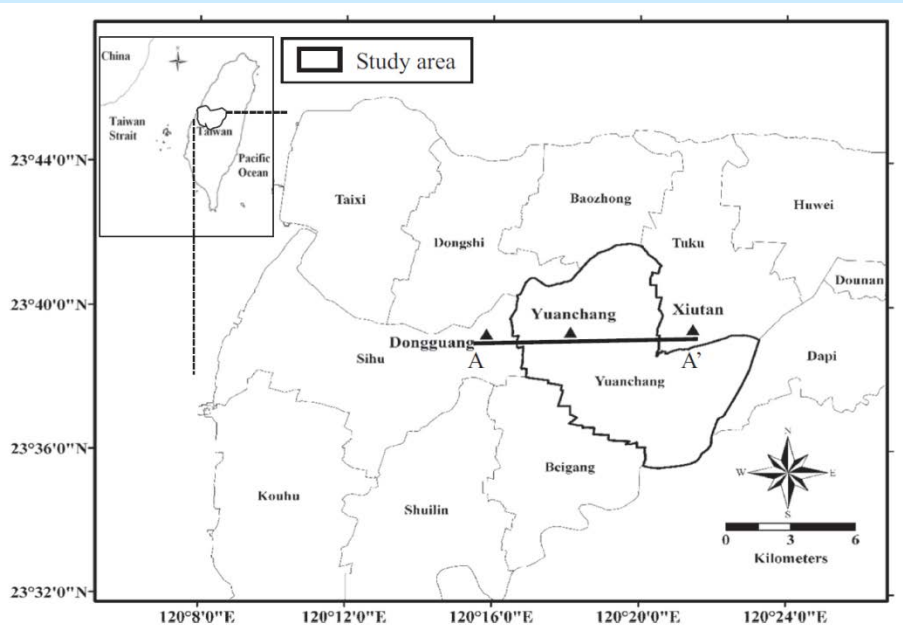
3-D subsidence modeling



Aquifer 2: Single-layer contribution

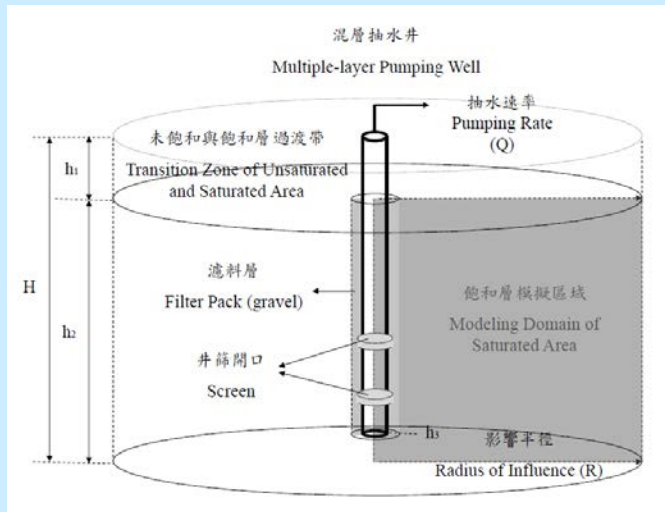


Aquifer 2: Multi-layer contribution



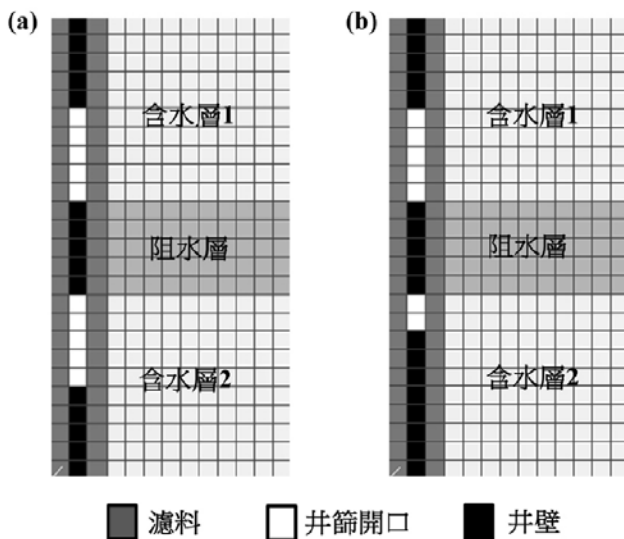
(Lin et al., 2015)

Multi-layer pumping



案例	抽水深度(公尺)	井篩深度(公尺)	含水層導水係數比值(T_1/T_2)	模擬出水量比值(Q_1/Q_2)
點抽水	0.5	0~25	1.04	1.94
	12.5	0~25		1.04
	24.5	0~25		0.57
線抽水	0~25	0~25		1.04
井篩長度	0.5	5~10 & 15~20		1.86
	0.5	5~10 & 15~17		1.91

Q_n 為第 n 含水層模擬出水量
 T_n 為第 n 含水層導水係數



(蔡文瀚等人, 2013)

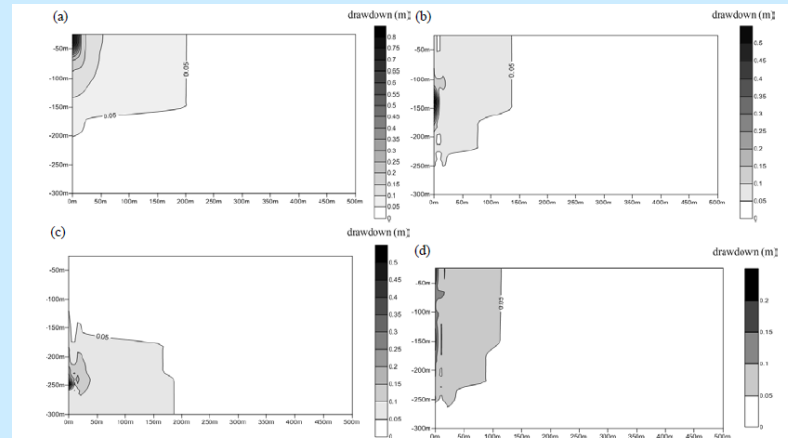
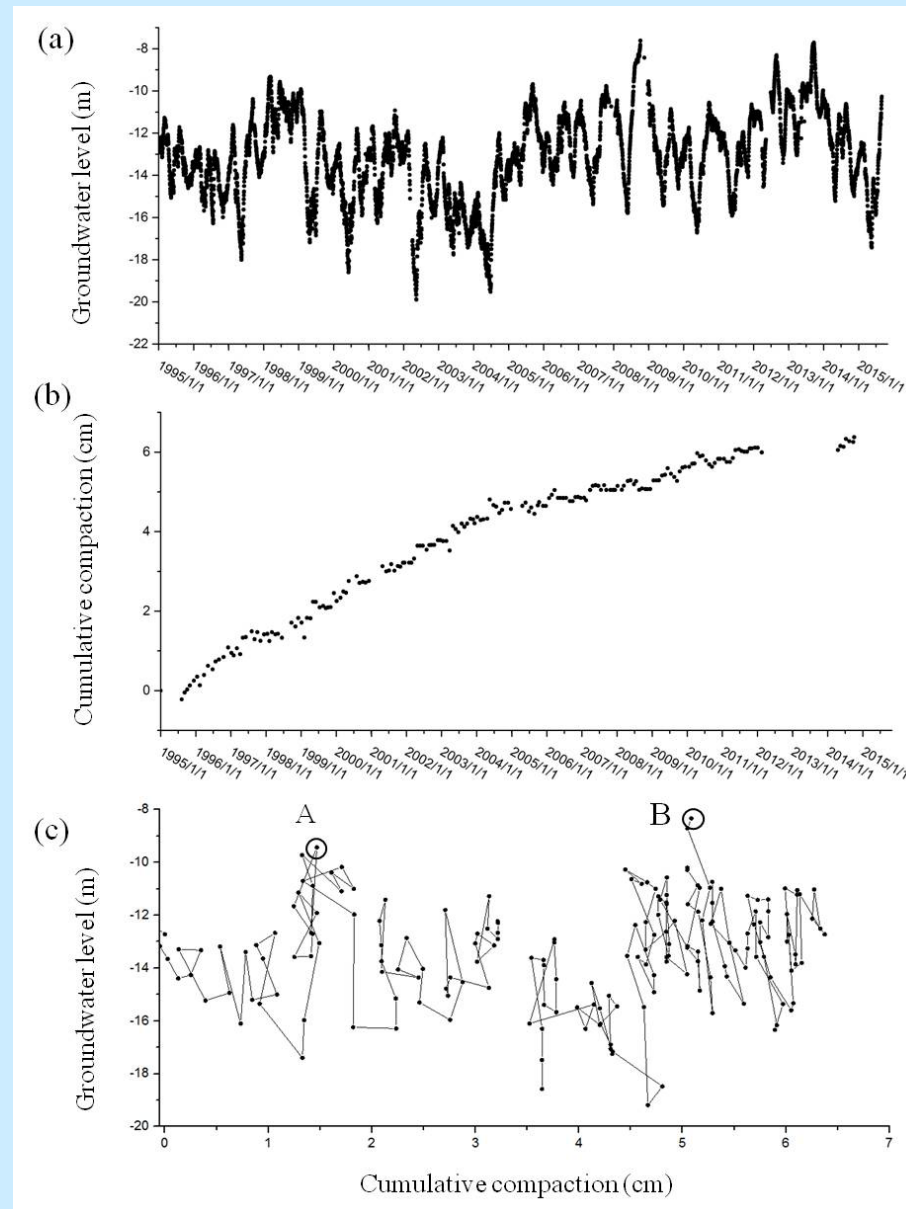


表3 元長7號井各案例之含水層出水量比例比較表

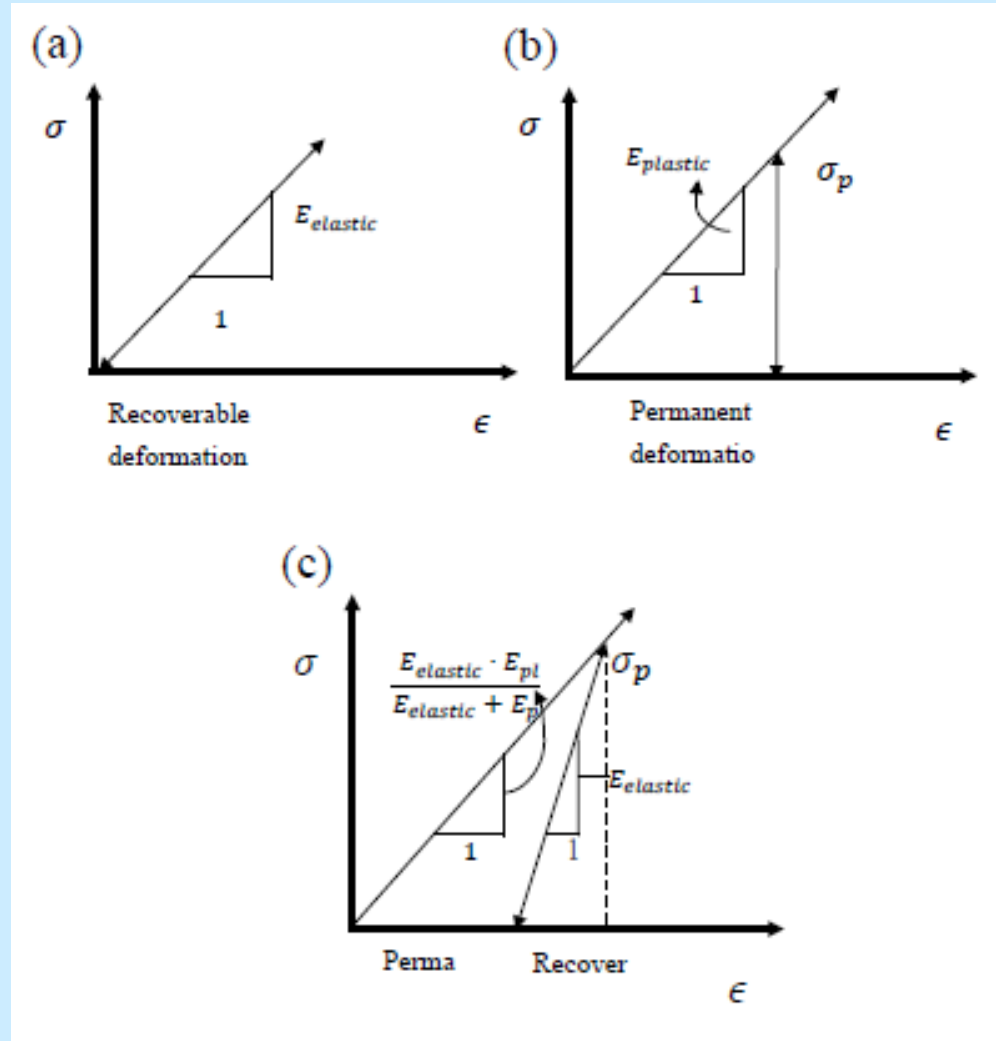
比例	抽水深度(公尺)與所在位置			
	42.5	137.5	252.5	25 ~ 235
第一阻水層	第二含水層	第四含水層	均布	
模擬出水量比例 ^a ($Q_2:Q_3$)	13.04 : 2.16	5.60 : 2.36	0.61 : 0.98	3.64 : 1.77
含水層導水係數比例 ^b ($T_2:T_3$)	1.93 : 0.98			

Q_n 為第 n 含水層模擬出水量； T_n 為第 n 含水層導水係數；^a 以 Q_4 為1做為基準；^b 以 T_4 為1做為基準

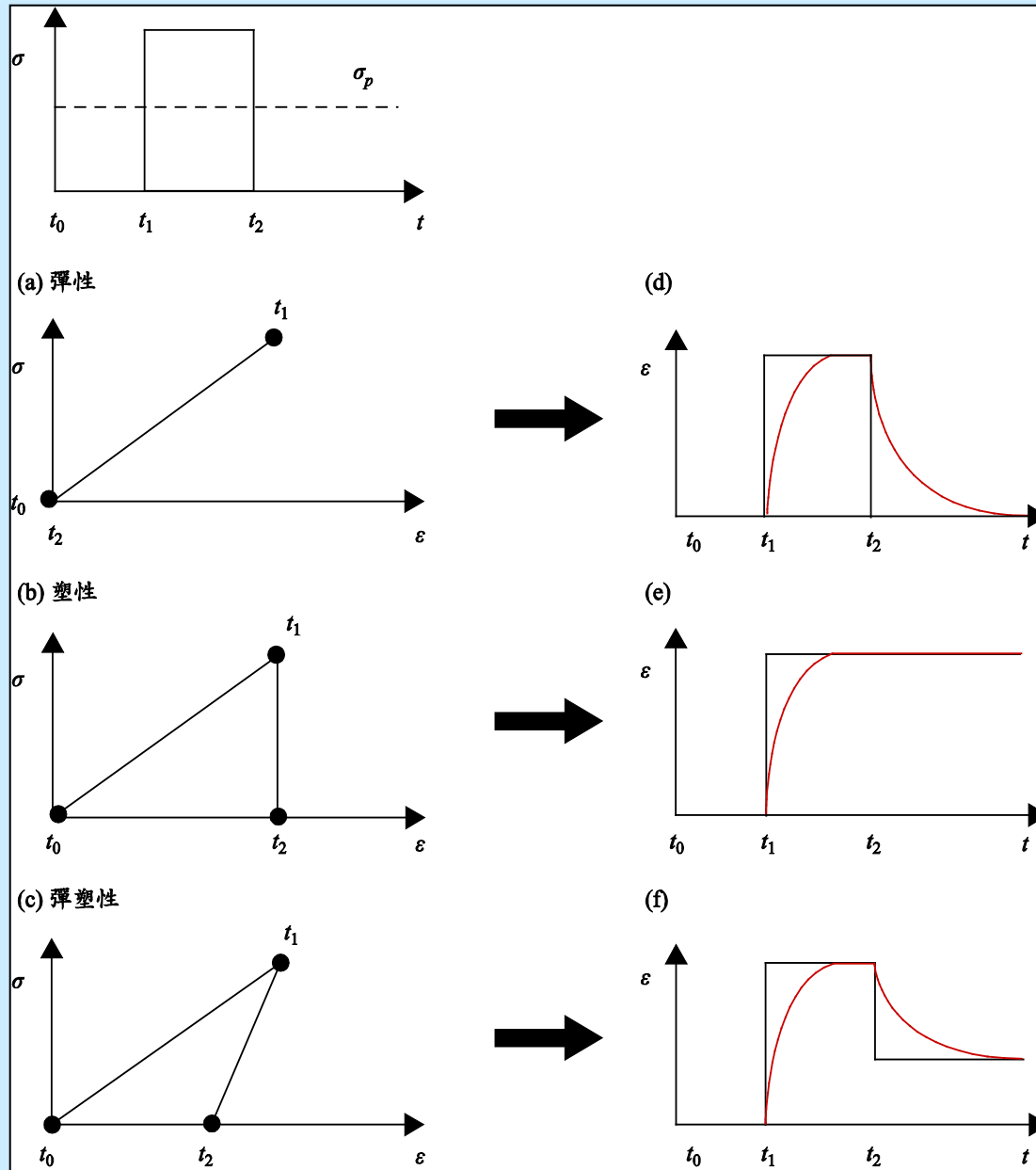
Groundwater level and cumulative compression at Boltz station of aquifer 2-2



Stress-strain relations for (a) elastic, (b) plastic and (c) elasto-plastic model



Viscous effect



Poromechanical models

(a) Elastic model



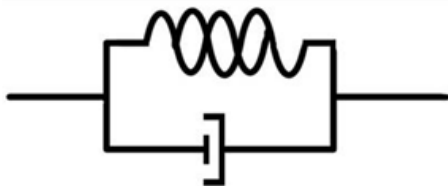
(b) Plastic model



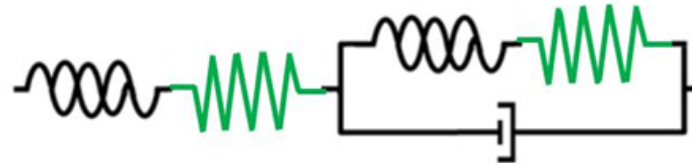
(c) Elasto-plastic model



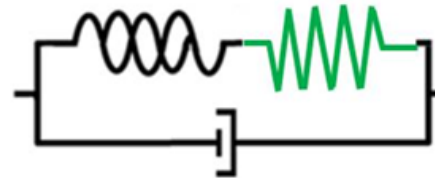
(d) Visco-elastic model



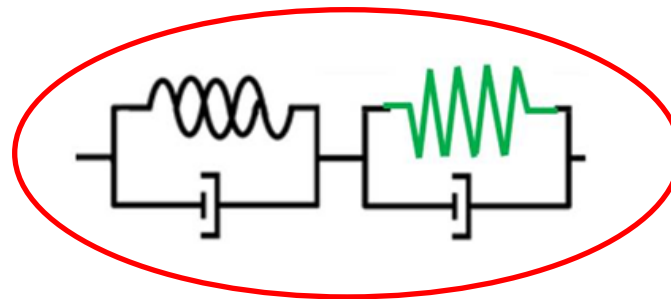
(e) VEP 1 model



(f) VEP 2 model



(g) proposed VEP model



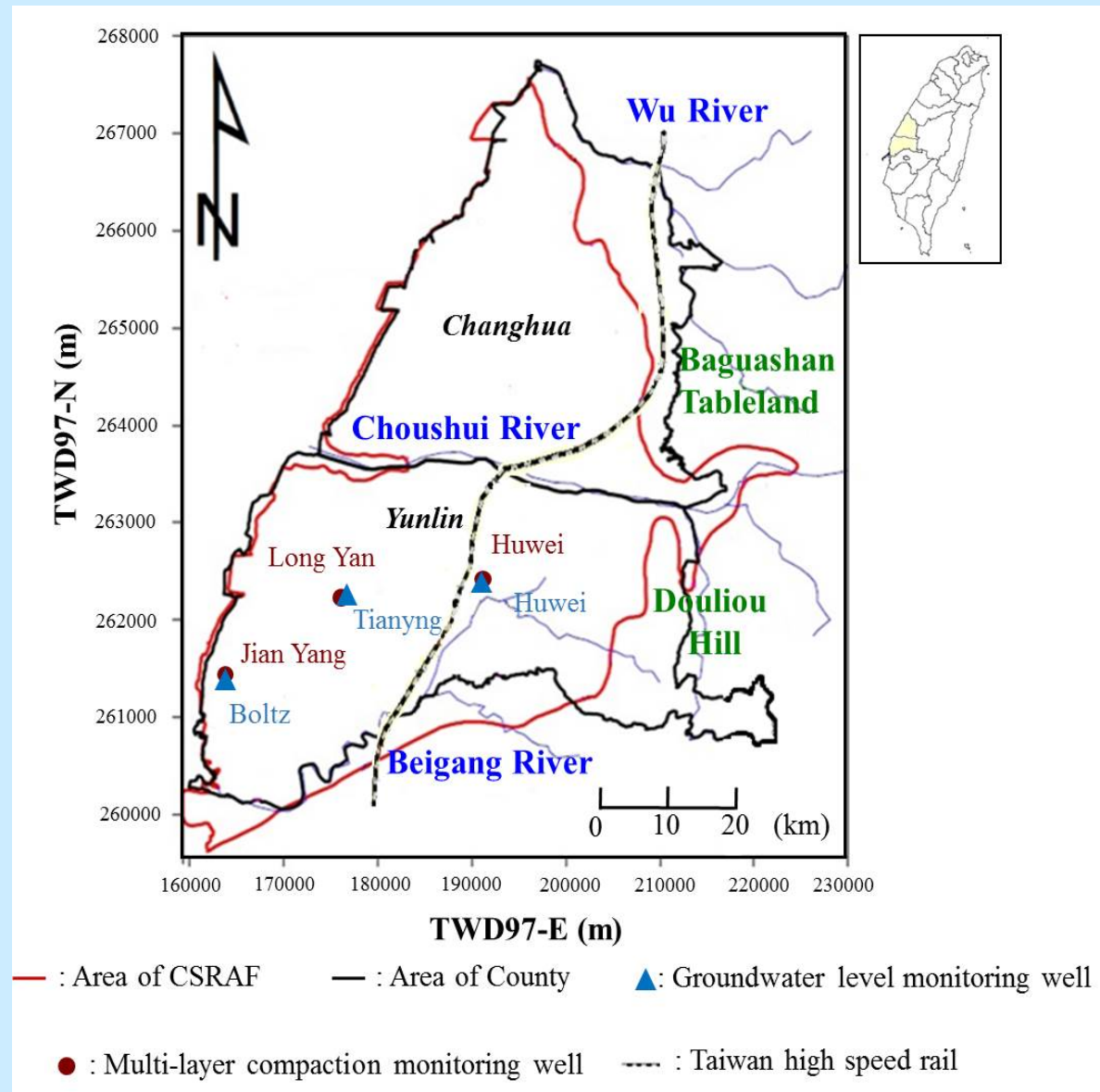
 : Elastic spring  : Plastic spring



Parameter used in the model

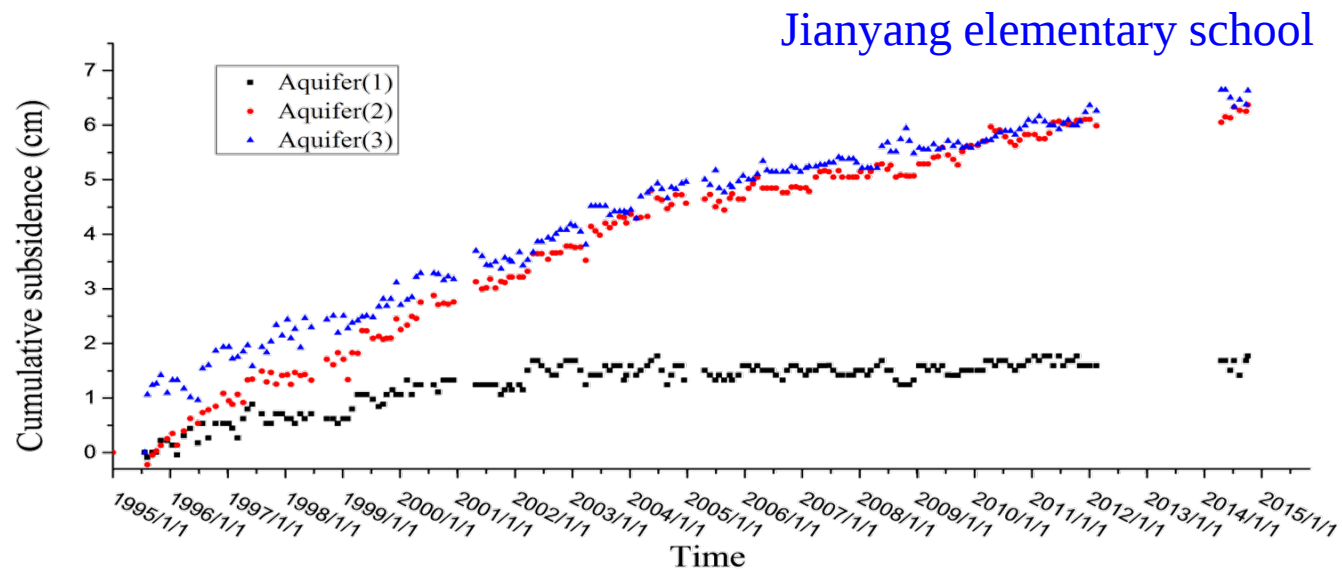
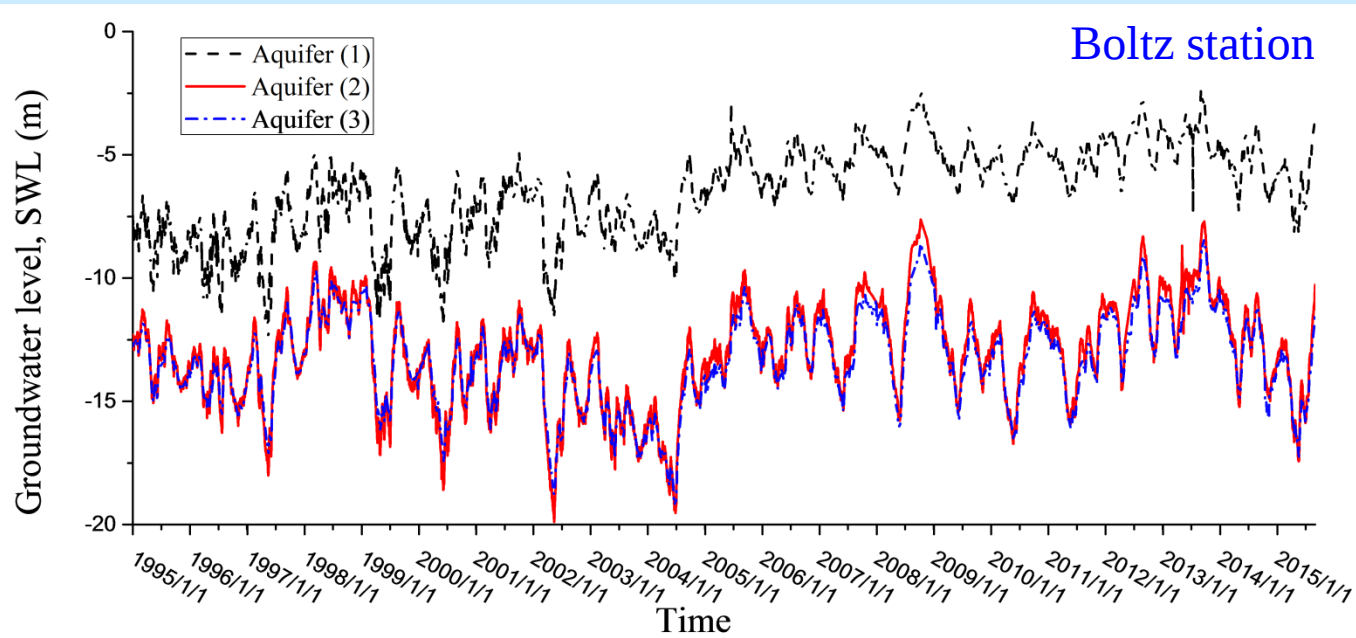
	彈性模數	塑性模數	黏滯係數
EL	✓	×	×
EP	✓	✓	×
VE	✓	×	✓
VEP	✓	✓	✓
SVEP	✓	✓	✓

Study area

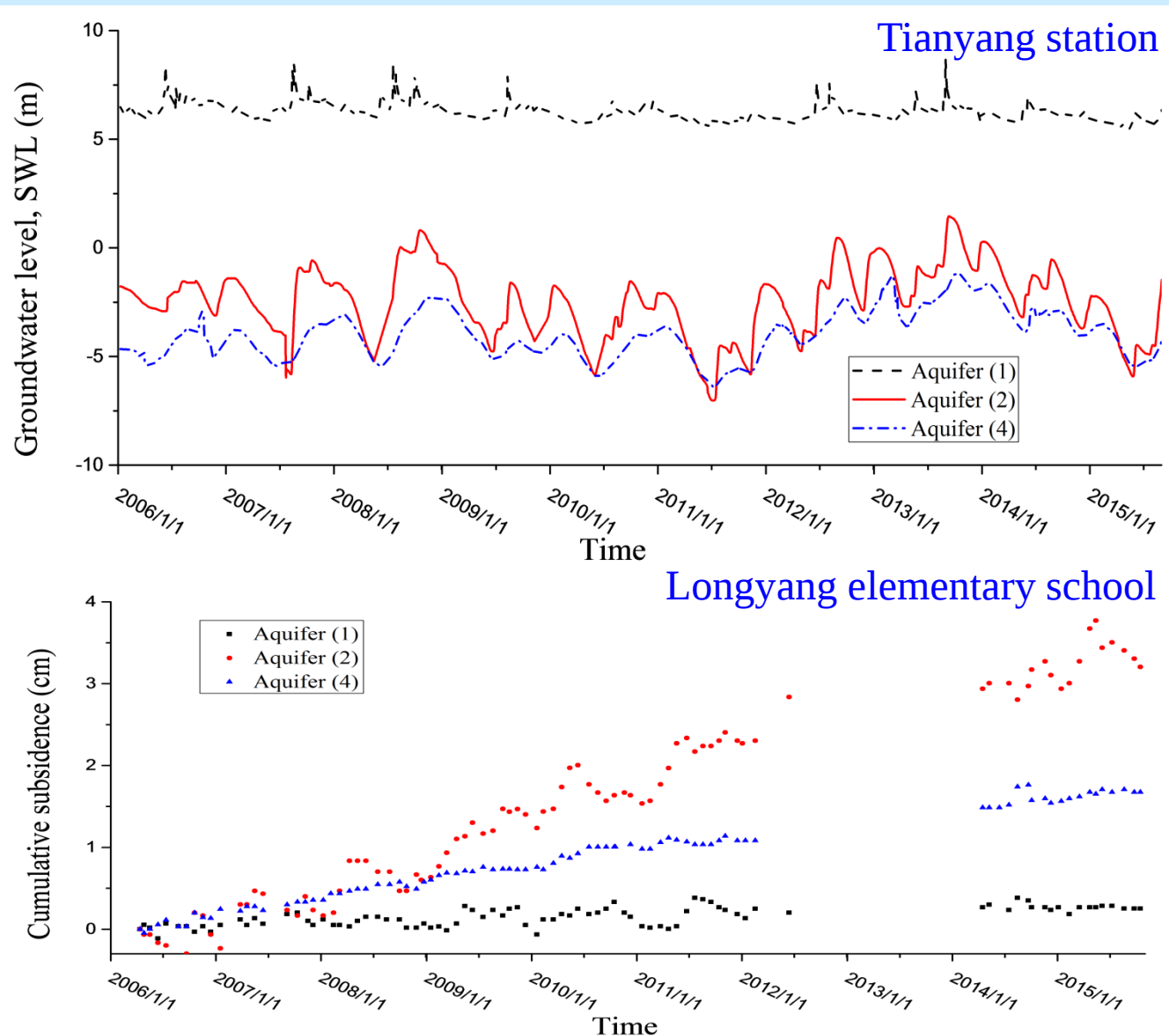


The distal fan

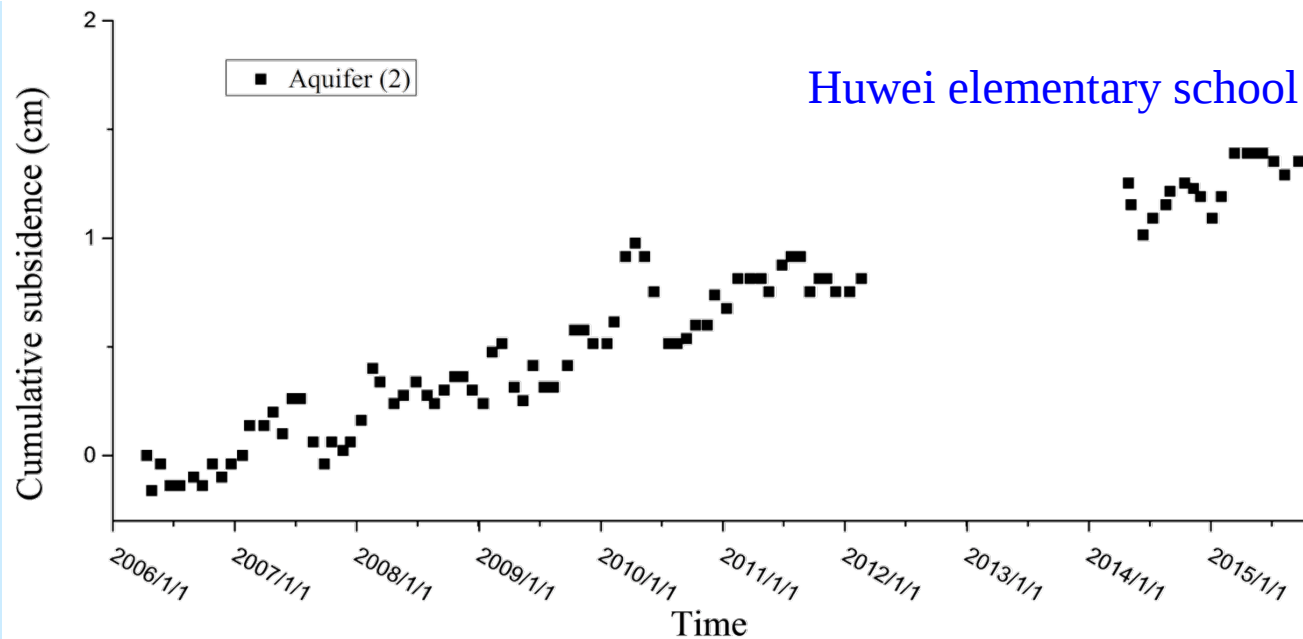
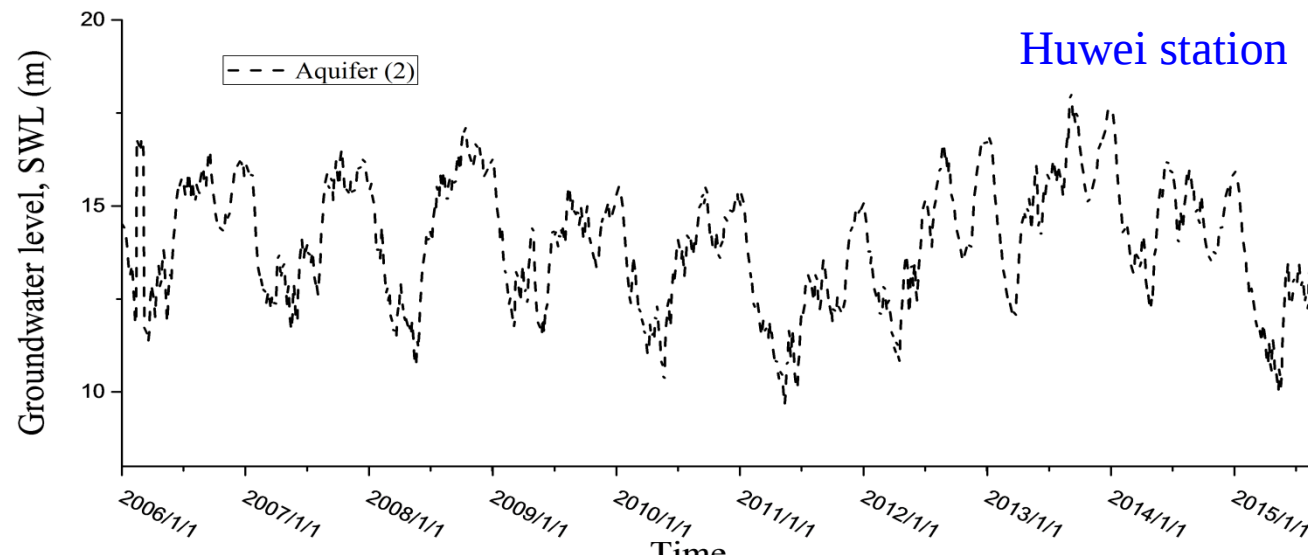
• Jia



The middle fan



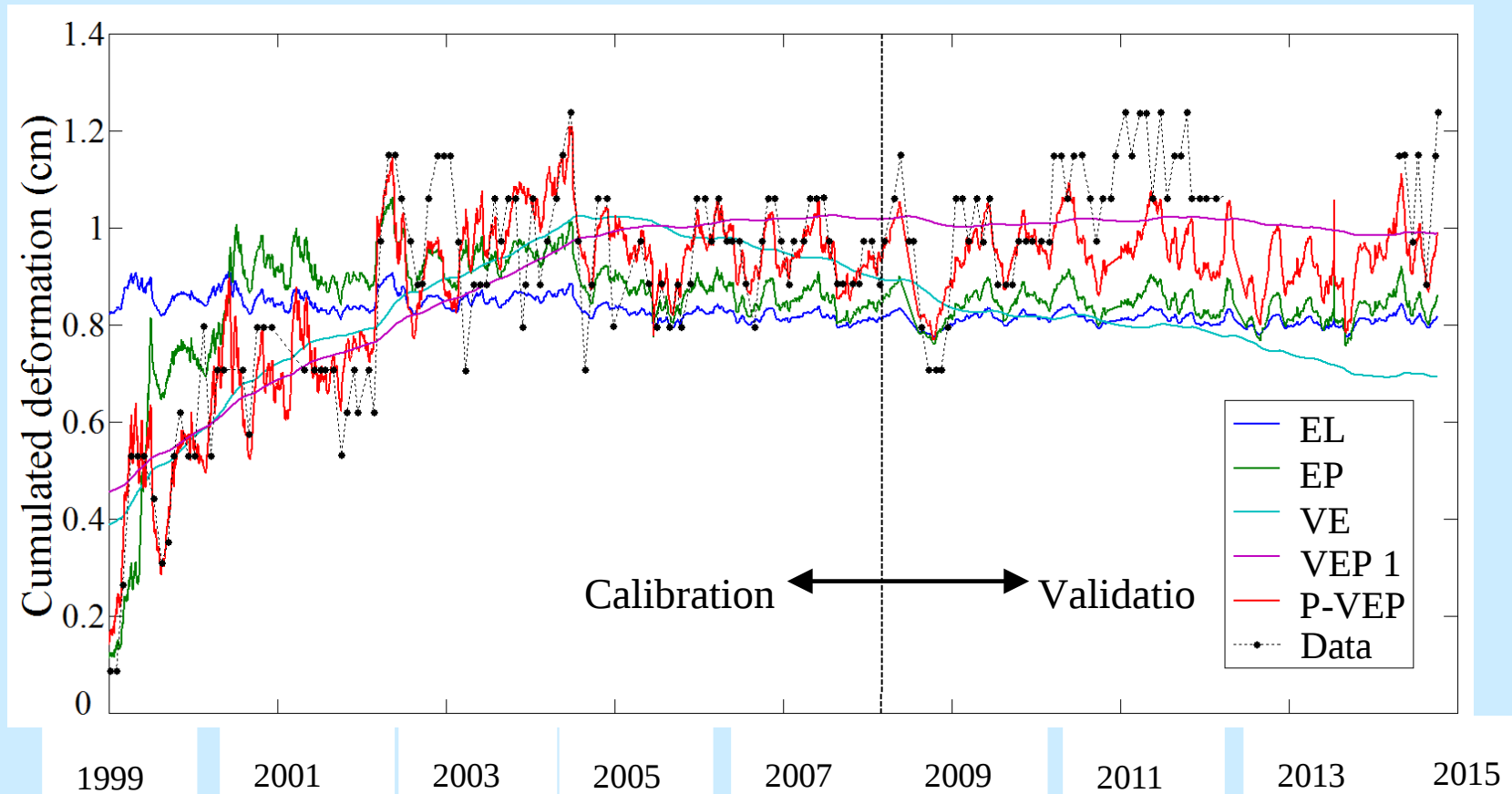
The proximal fan



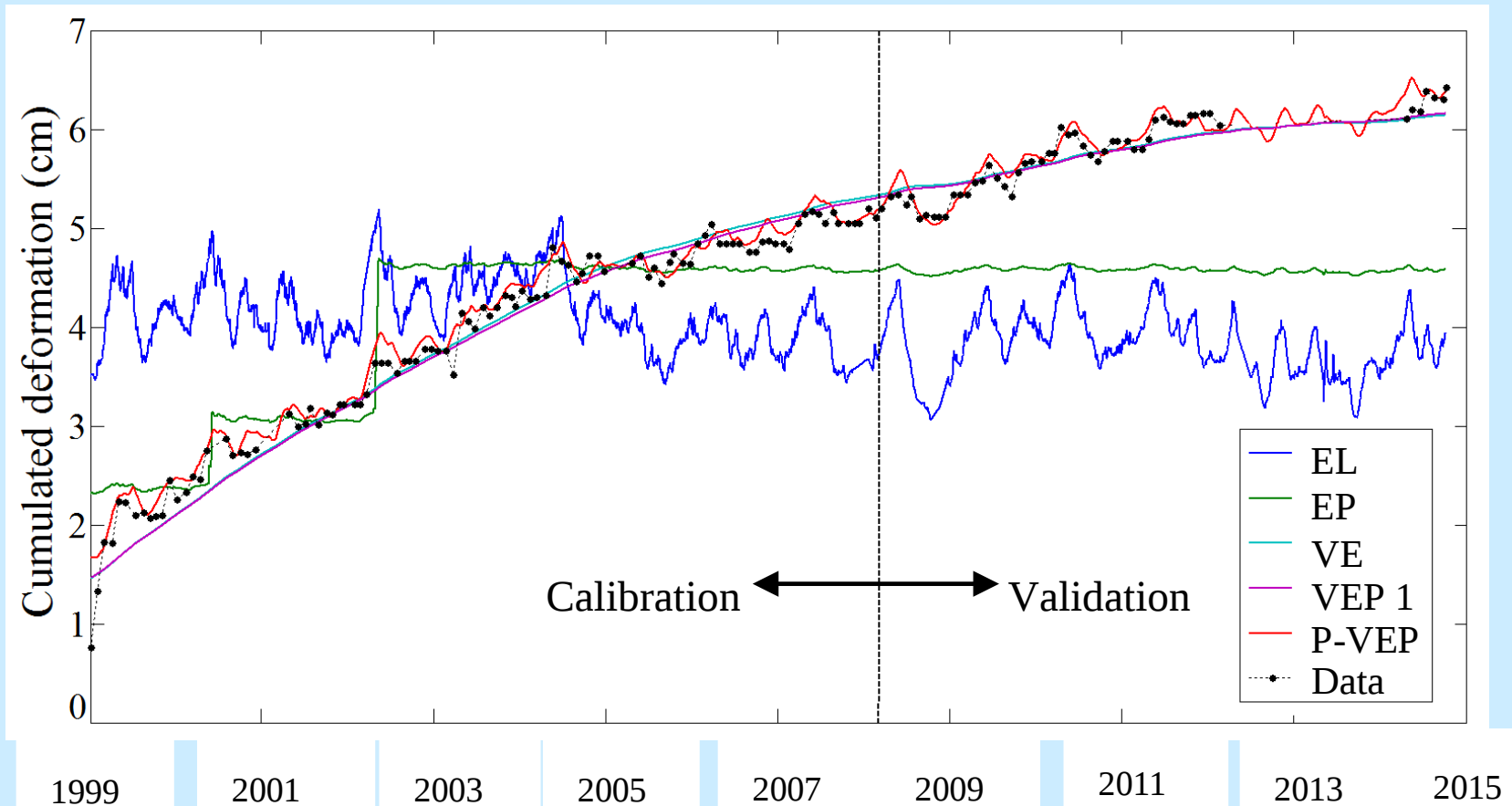
Data used

Site	Calibration	Verification
Boltz	1999/1/6~2007/12/12	2008/1/17~2014/10/4
Tianyang	2007/1/7~2010/12/10	2011/1/20~2015/12/16
Huwei	2007/1/25~2010/12/8	2011/1/13~2015/12/14

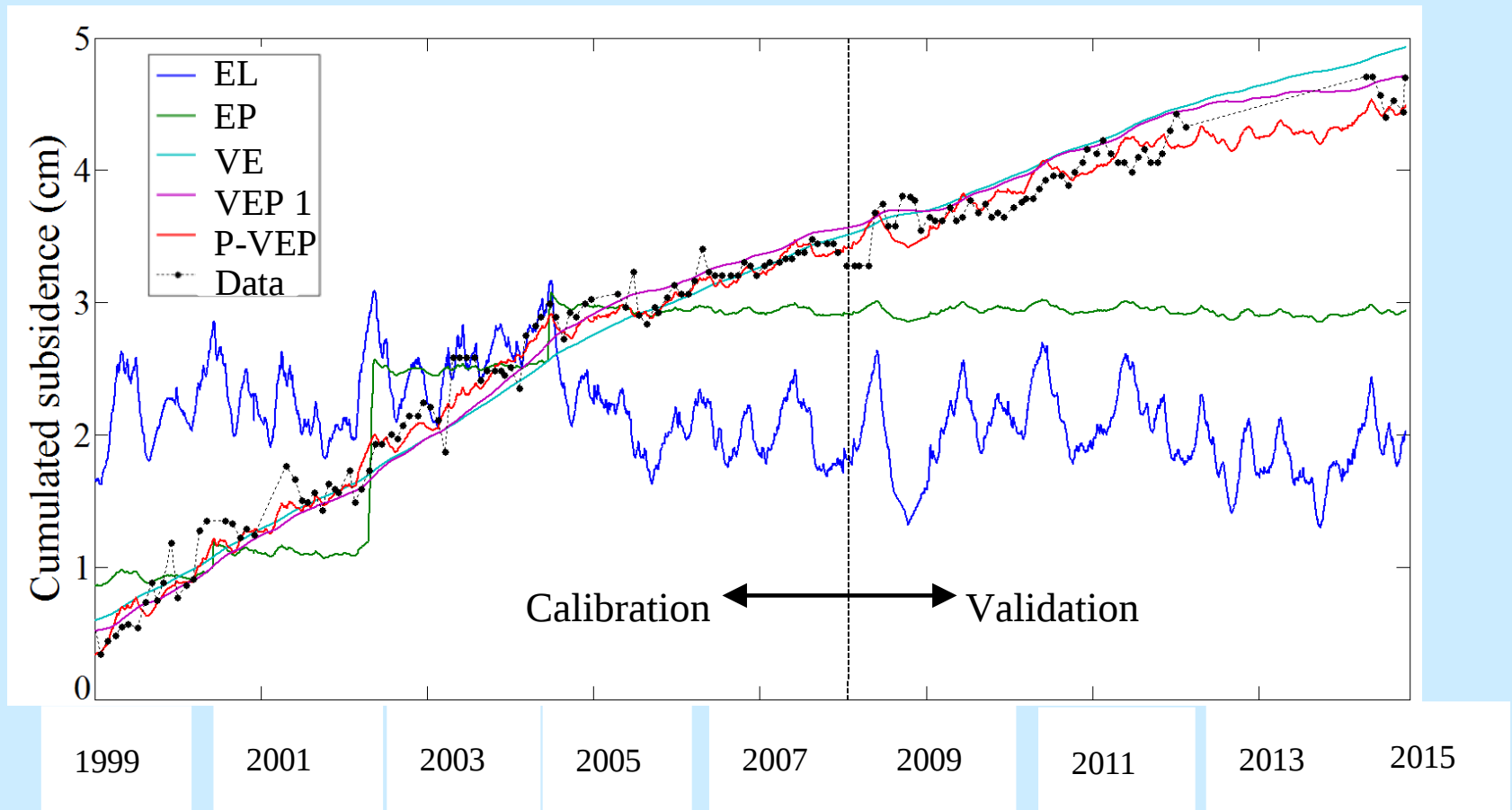
Aquifer 1 of Boltz station



Aquifer 2 of Boltz station



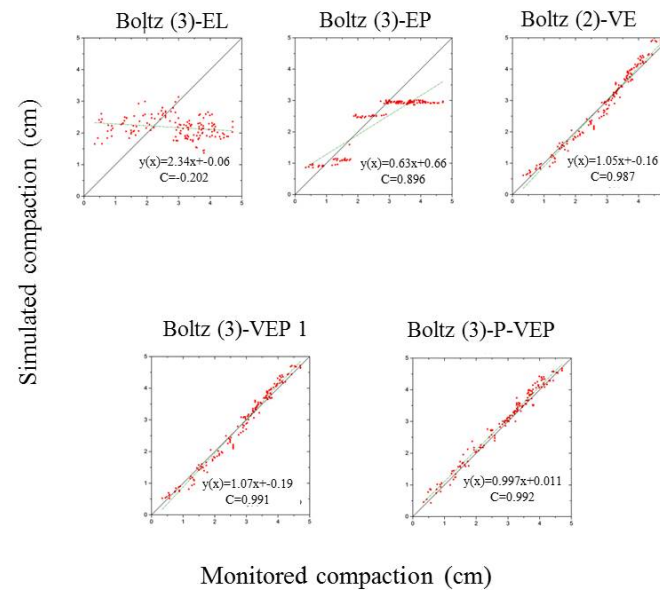
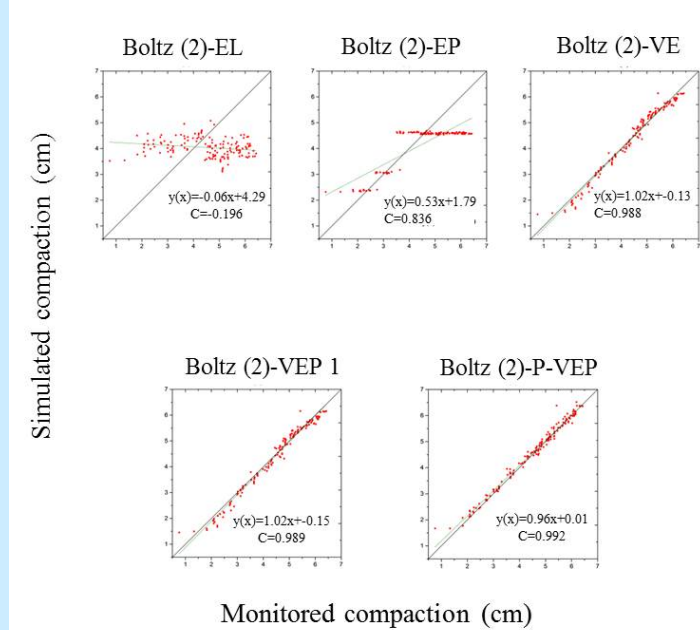
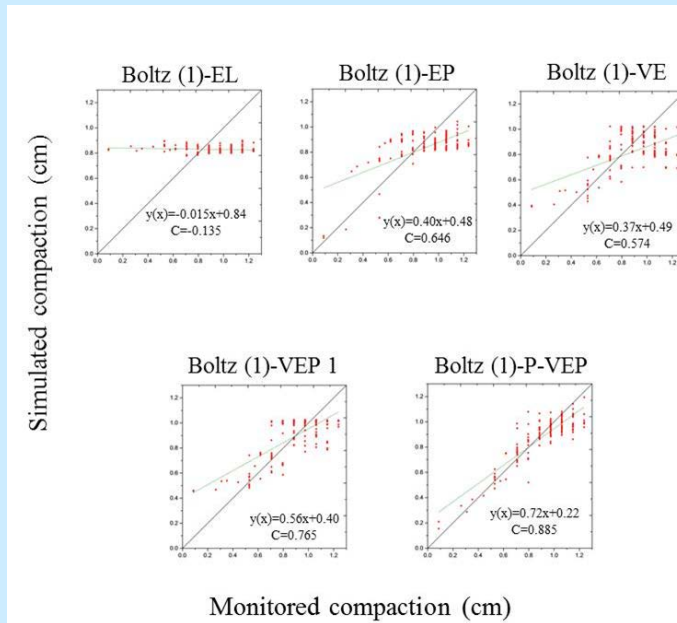
Aquifer 3 of Boltz station



$$ARE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{s_i - \hat{s}_i}{\hat{s}_i} \right|}{n}$$

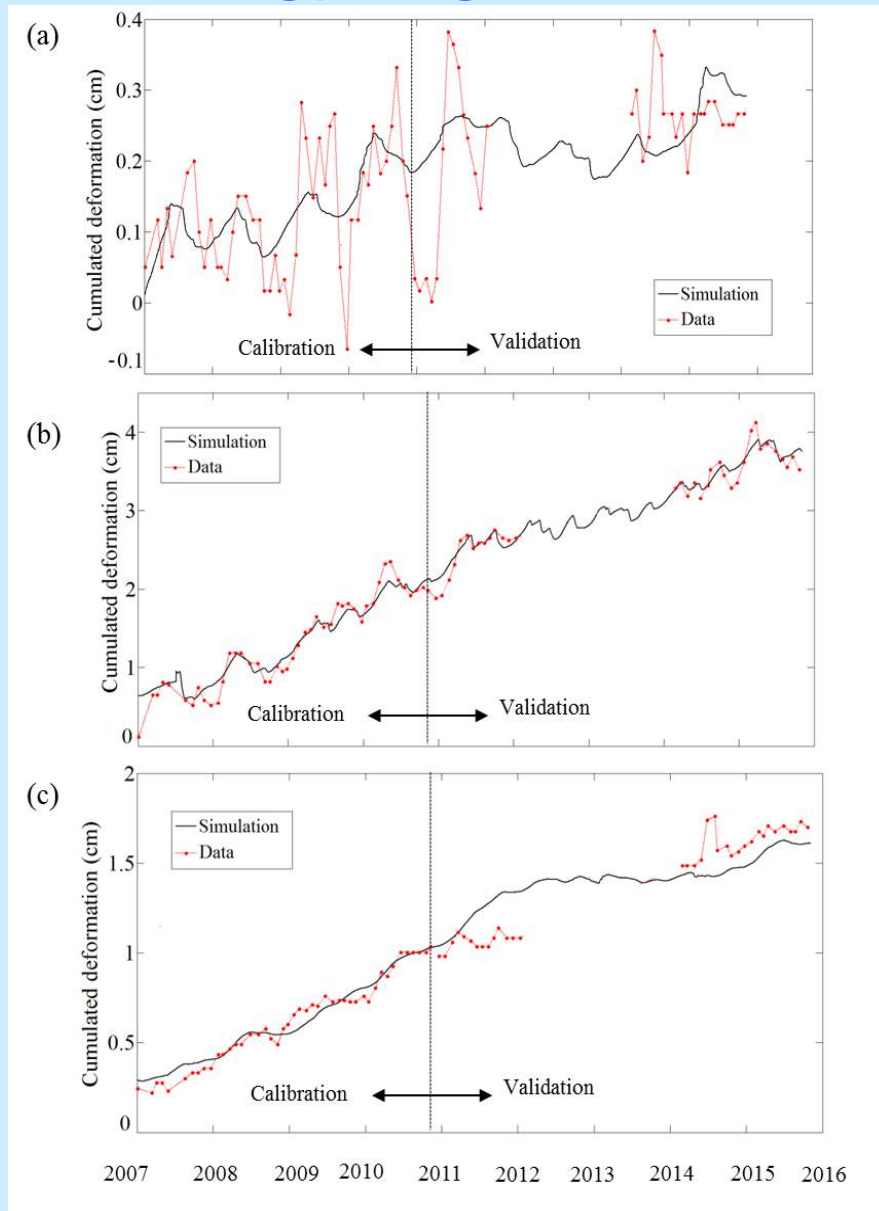
	Model	Calibration (%)	Verification (%)
Aquifer 1	EL	41.74	21.27
	EP	19.40	18.08
	VE	20.02	22.84
	VEP1	22.19	11.19
	VEPS	10.42	9.73
Aquifer 2	EL	35.30	31.63
	EP	11.80	19.61
	VE	5.63	2.46
	VEP1	5.73	2.38
	VEPS	4.31	1.59
Aquifer 3	EL	61.54	46.92
	EP	18.02	24.42
	VE	9.00	4.77
	VEP1	8.81	4.04
	VEPS	6.47	3.34

Boltz station

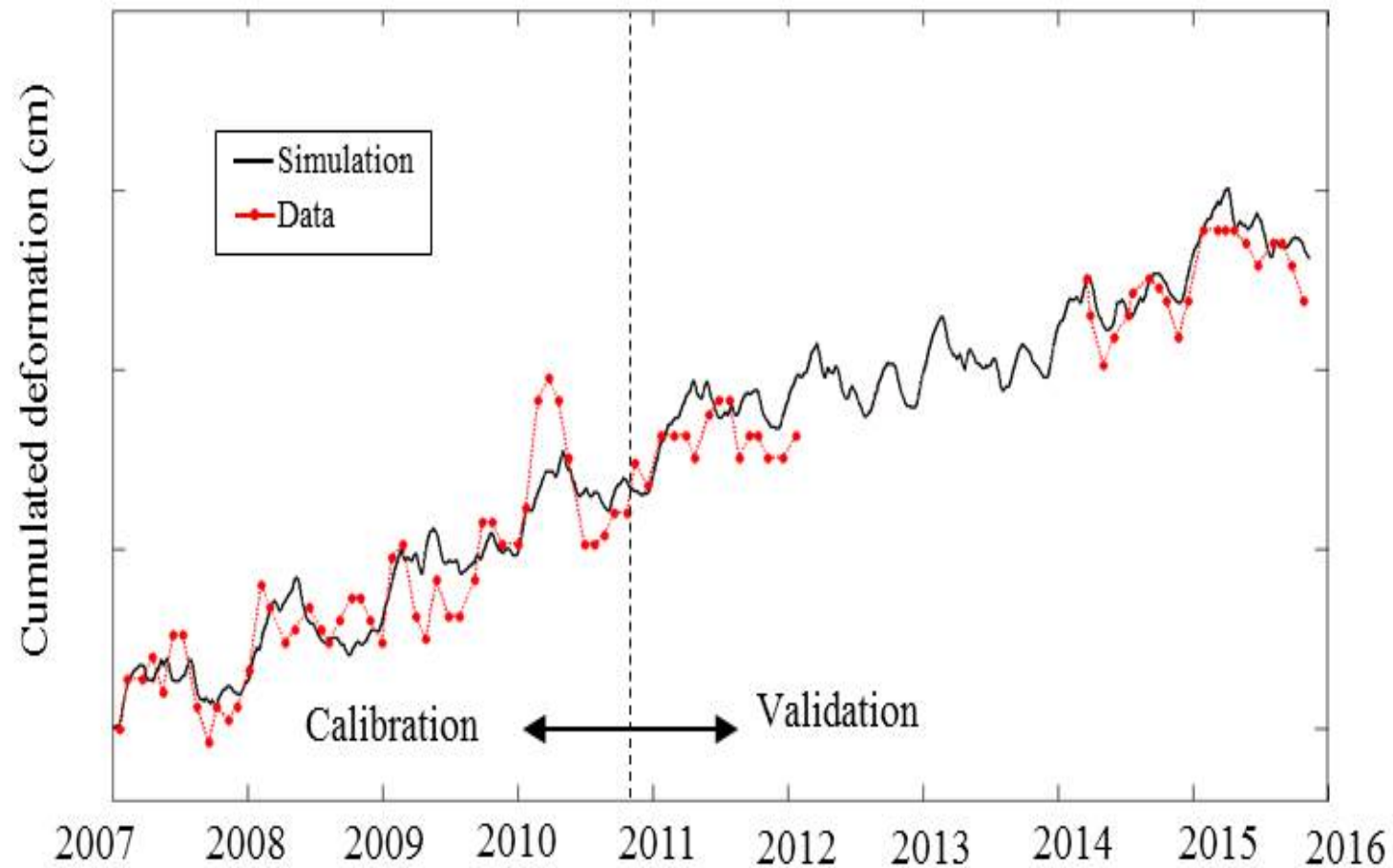




(a) aquifer 1, (b) aquifer 2, and (c) aquifer 4 at Tingyang station

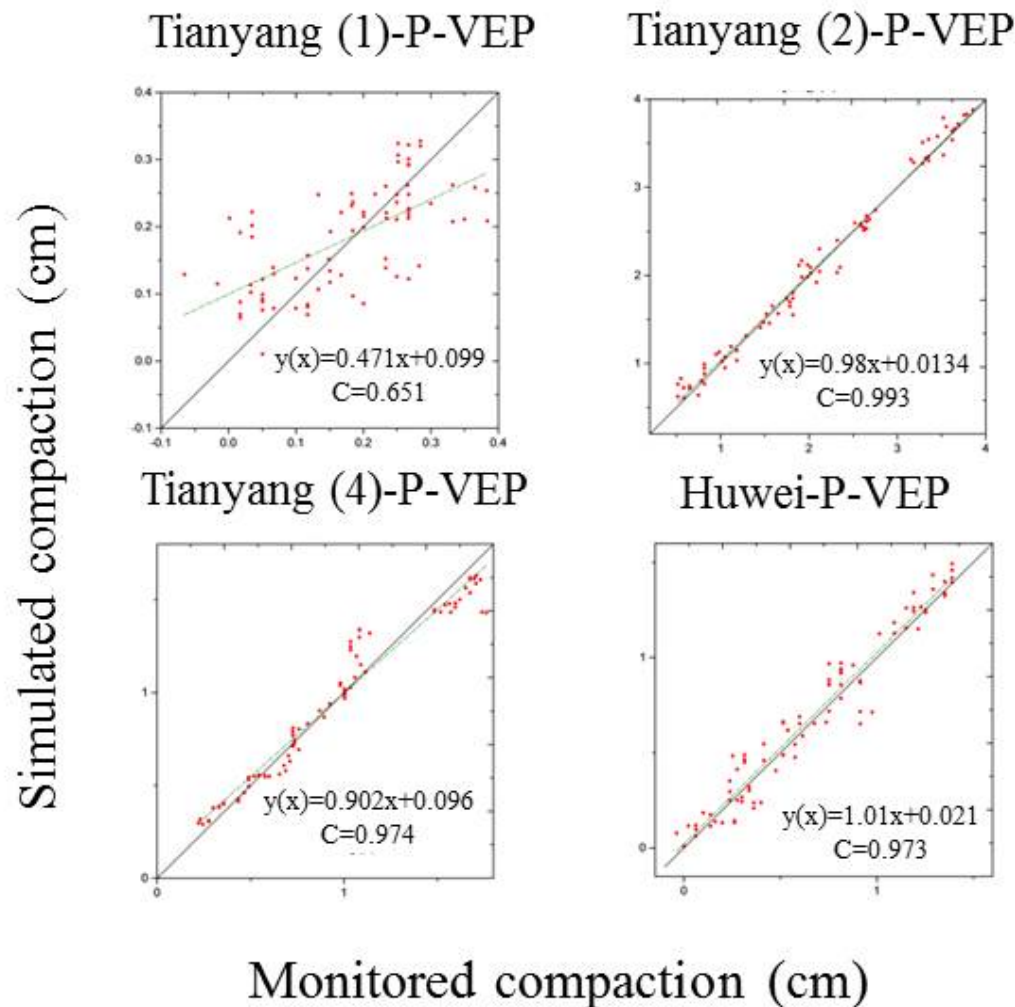


Aquifer 2 at Huwei station



Site	Calibration (%)	Verification (%)
Tianyang (1)	41.69	446.91
Tianyang (2)	19.01	3.40
Tianyang (4)	8.38	9.79
Huwei (2)	27.68	7.69

(a) aquifer 1, (b) aquifer 2, (c) aquifer 3 at TingYang station and (d) aquifer 2 at Huwei station





Spatial variation of poromechical property

$$SRF_e = \frac{E_e}{\eta_e} \quad SRF_p = \frac{E_p}{\eta_p}$$

$$m = \frac{E_{over}}{E_{nor}} = \frac{E_e + E_p}{E_p}$$

the speed of the system response to external loading

the recovery difficulty of an aquifer

Station	Aquifer	E_e (N/m ²)	E_p (N/m ²)	$SRFe$ (1/day)	$SRFp$ (1/day)	m
Boltz	1	3.41×10^8	7.91×10^8	1.13	8.26×10^{-4}	1.43
	2	3.42×10^8	6.91×10^7	5.29×10^{-2}	1.94×10^{-4}	5.91
	3	5.64×10^8	2.97×10^7	2.60×10^4	1.56×10^{-4}	19.99
TianYang	1	2.05×10^8	9.08×10^7	1.00×10^{-2}	3.64×10^{-1}	3.26
	2	5.79×10^8	4.50×10^7	3.83×10^4	1.31×10^{-4}	13.87
	4	6.63×10^8	3.73×10^7	1.29×10^4	9.17×10^{-5}	20.67
Huwei	2	6.05×10^8	1.01×10^8	1.41×10^{-1}	1.23×10^{-4}	6.99

Conclusions

- The poromechanism is complex in the Choushui River alluvial fan, Taiwan.
- The phenomenon of subsidence is clear but the contributors are still arguable.
- The visco-elastic-plastic model better describe the deformation.
- The proposed VEP model outperforms other models.
- The poromechanical property spatially varies in CSRAF.
- Heterogeneity is required for accurate modeling.



What can we do more?

- How does the soil compaction damage the groundwater system?
- What is the dynamic characters of pore-mechanism?
- How does the local deformation affect infrastructure and constructions?
- What extend is the lateral subsidence and how does hydrogeology involve?
- How to apply the hydraulic-mechanical-transport (HMT) coupling?

*All things are difficult before they are
easy.*

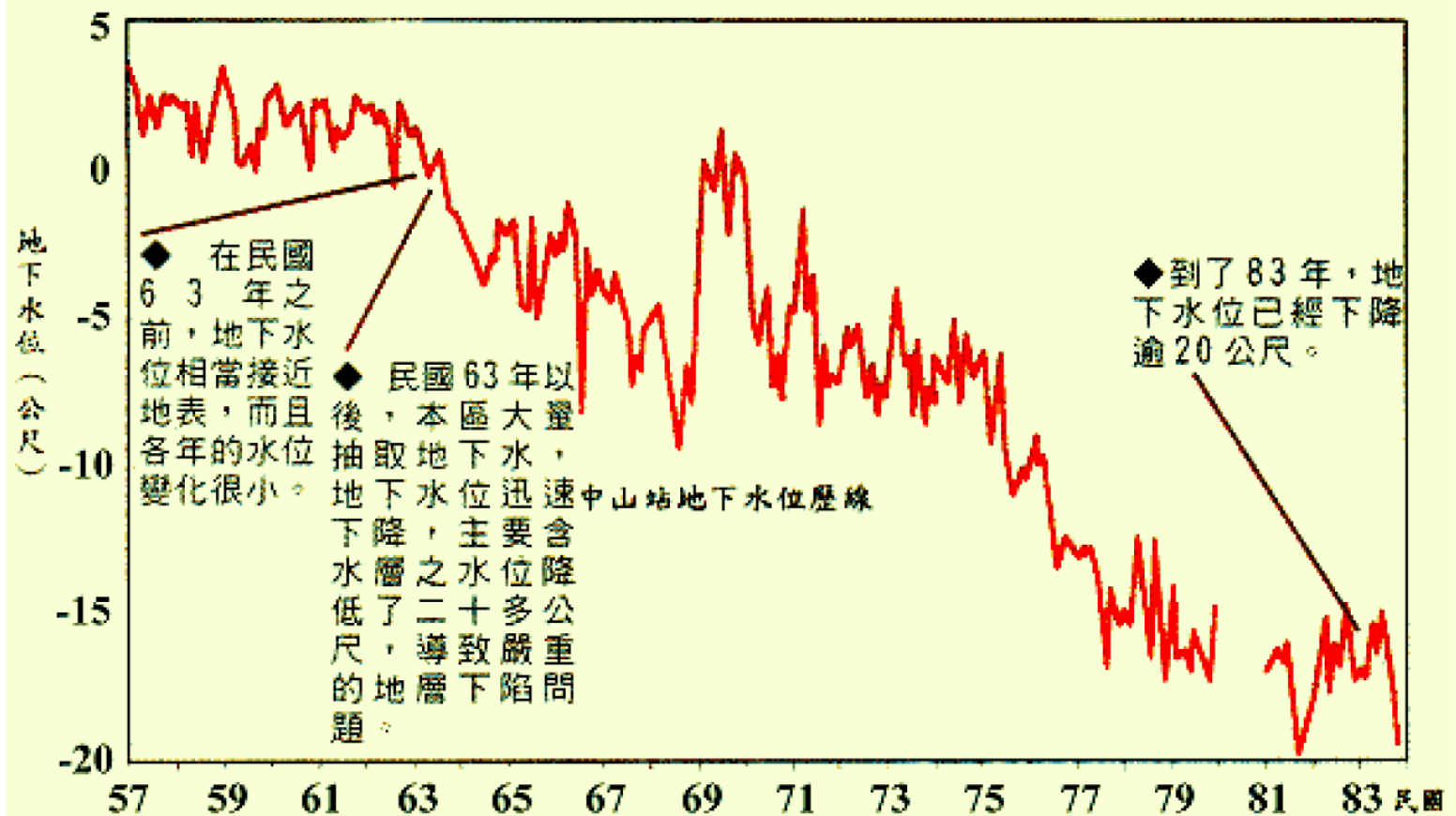
Thomas Fuller
Gnomologia

Questions are welcomed!



[Quick and Dirty Tips](#)

台西麥寮中山站





張素玢