

中国華北平原の地下水と水循環

近藤昭彦(千葉大学環境リモートセンシング研究センター)



研究グループ

唐 常源¹⁾・佐倉保夫²⁾・新藤静夫³⁾・田中 正⁴⁾・嶋田 純⁵⁾
・芝野博文⁶⁾・陳 建耀⁷⁾・沈 彦俊⁷⁾

1)千葉大学自然科学研究科、2)千葉大学理学部、3)千葉大学名誉教授、
4)筑波大学地球科学系、4)熊本大学理学部、6)東京大学演習林、7)千葉大学大学院生



Hydrological Cycle in North
China Plain and Its
Implications to
Water Problem

21世紀の地球環境問題

新しい地球環境問題 - 水問題 -

ここで扱う水問題

取水技術の進展が農業生産量を増大させたが、水資源、特に地下水の更新性に関する知識の不足により短期の利益の追求が水資源の不可逆的な消費に繋がりがつつある問題

世界中で同様な背景の元で多発し、影響が国境を越える問題

グリーンウォーター(ヴァーチャルウォーター)と呼ばれる穀物の形に変えた水の輸入が日本人の食を支えている状況から水問題は国境を越えた問題と言える

USAのハイプレーン地域 - 極端な事例 -

地下水過剰揚水による地下水位低下が節水農業の普及に繋がったが、それがさらに大きな水利用、穀物生産を促している 経済活動を止めることはできない...

中国華北平原 - レスター・ブラウン著「誰が中国を養うのか」、ダイヤモンド社によって報告 -

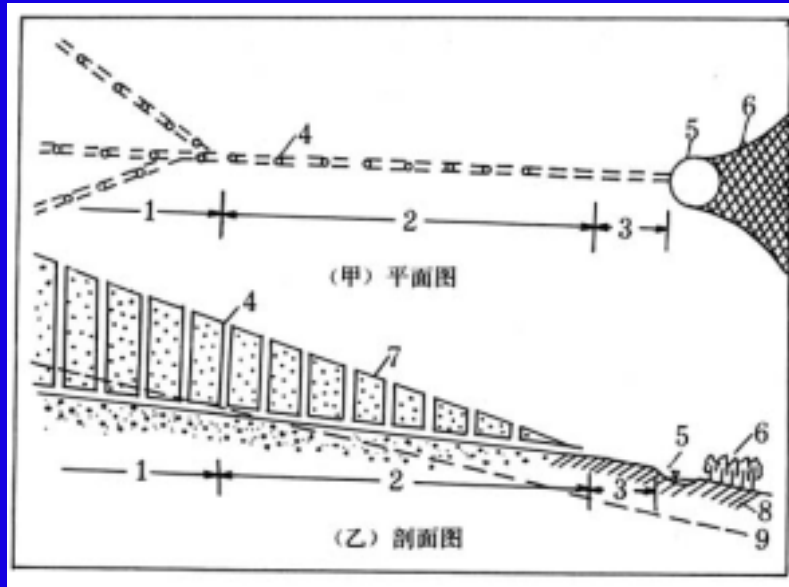
地下水利用は1940年代に始まり、小麦とコーンの生産は飛躍的に伸びたが、同時に地下水位は低下を続けている。しかし、灌漑手法は湛水灌漑が多く、まだ節水農業の余地は多く残されている

地域の事例研究ではなく、より大きなフレームワークの中に位置付ける - 比較水文学的立場 -



新疆トルファンの坎儿井(カレーズ)

同じような背景のもとで進行中の地下水問題



坎儿井は天山山脈の融雪水を源とする扇状地の地下水を長い人工トンネルを穿ってオアシスに導水する伝統的システムである。持続可能なシステムであるが、維持・管理が大変であるため最近では井戸、開水路による導水が盛んに行われ、坎儿井は衰退しつつある。同時に地下水位は低下を続けているという。

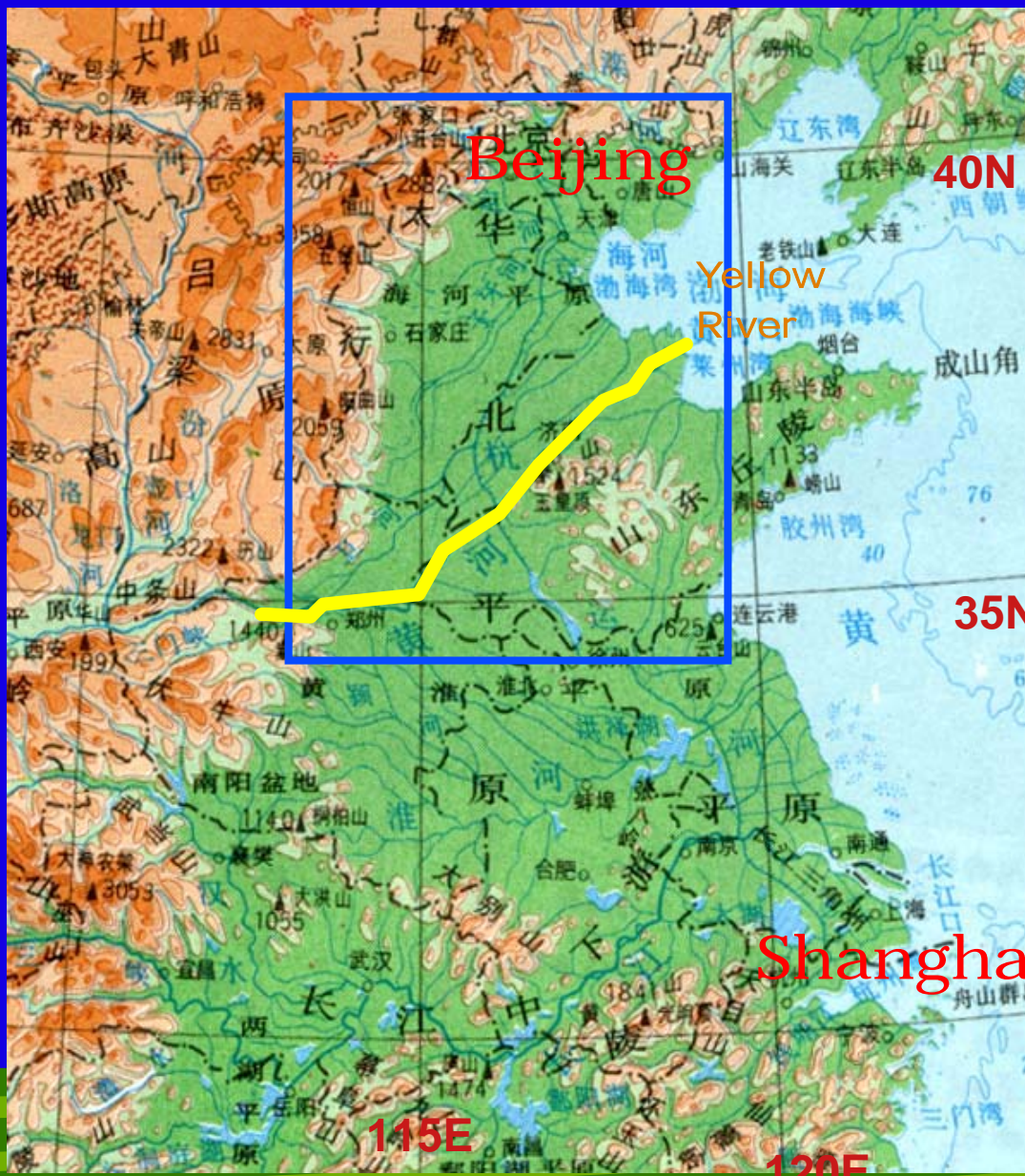


左: 爽やかな風が吹く坎儿井の出口、しかしオアシスを一歩出ると、そこは荒涼としたゴビである。

右: 地下水揚水井。資金さえあれば簡単に水が手に入り、維持・管理も楽である。

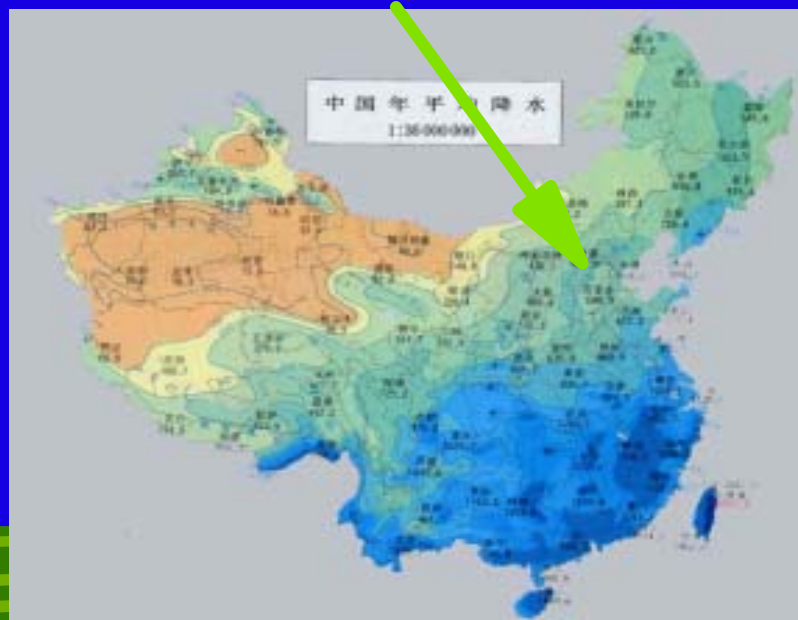


華北平原はどこにあるか



長城の南、太行山の東、淮河の北を華北平原と呼ぶが、中国の水文研究者は黄河の北側を華北平原と呼ぶことが多い。それは黄河の北側で水問題が顕在化しているからである。

年降水量は600 mm/year以下の半乾燥地域。



食糧生産で地球人口の増加を支える半乾燥地域

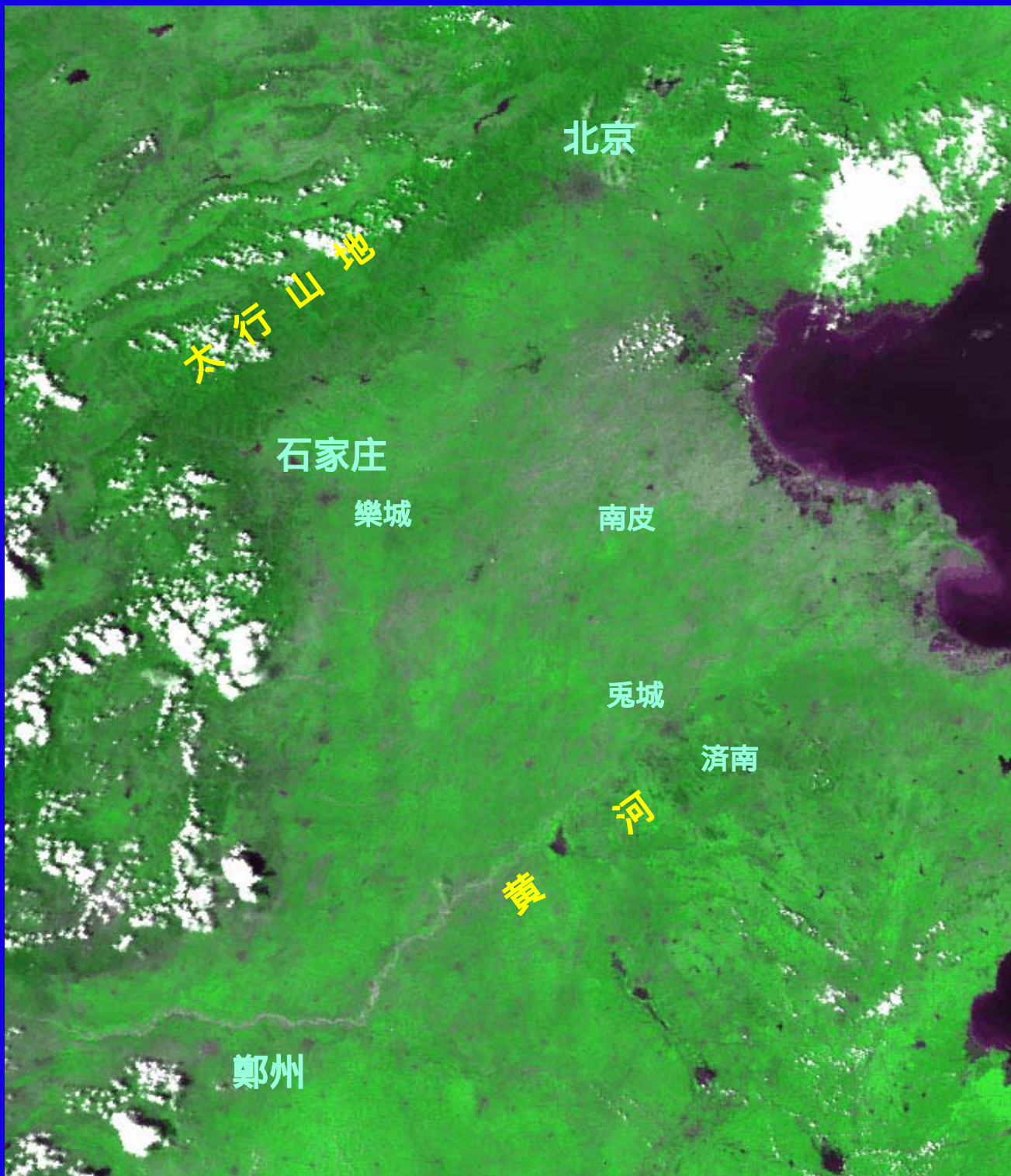
華北平原 (海河平原)

気象衛星NOAA-14による
1997年8月の画像(千葉大
学CEReS受信)

コーンの生育期にあたり、
平原部の緑は成長の程度
を表す

しかし、よくみるとその輝度
は均一ではない

土地条件により穀物生産
量が異なり、それは水循環
のあり方が関係している



華北平原の水文地域区分



山前平原(緑)

山麓平原・沖積扇状地
生産性高い

低平原(黄)

土地の塩性化
生産性低い

沿岸平野(赤)

土地の塩性化
生産性極めて低い



華北平原

華北平原で何が起きているか？

- 黄河の断流
- 地下水位の低下
- 塩分集積
- 水汚染



Brown and Halweil(1998)

中国の水不足が世界の食糧安全保障を揺るがすのだろうか？

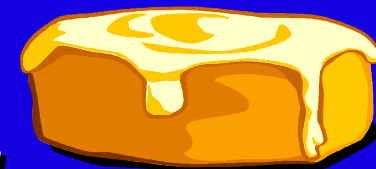
我々に何ができるのか？

- 華北平原における水循環の実態を知ること(平原におけるプロセス研究)
- 結果を知的資産として蓄積すること
- その成果を社会に還元すること

水循環の実態の理解なしに対策なし

- 誤った実態認識からは誤った対策しか生まれない

金で穀物や肉に形を変えた水を輸入しながら、相手国の水問題に無頓着であると国際世論の袋叩きにあう危険性があるとの指摘もされているが、日本という小国が生き残るためには科学的な現象認識、対策に対する経験という点で卓越したものを持ち続けることが必要ではないか



黄河の断流



1972年に最初の断流が発生した
回数は年々増加、95年には干上がった河床
の総延長は662kmに達した

80年代までは5月ないし6月に断流が発生した
が、1990年代には2月から4月に発生するよ
うになり(灌漑期に備えて水の確保)、洪水シー
ズンの7、8月にも発生するようになった

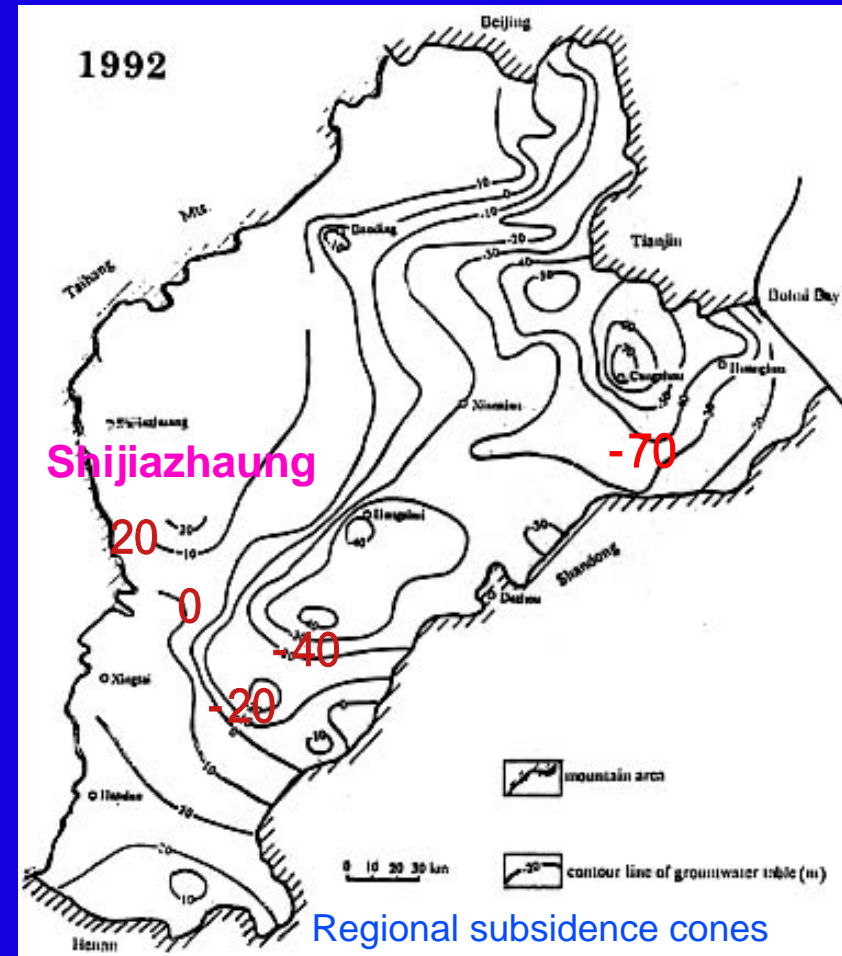
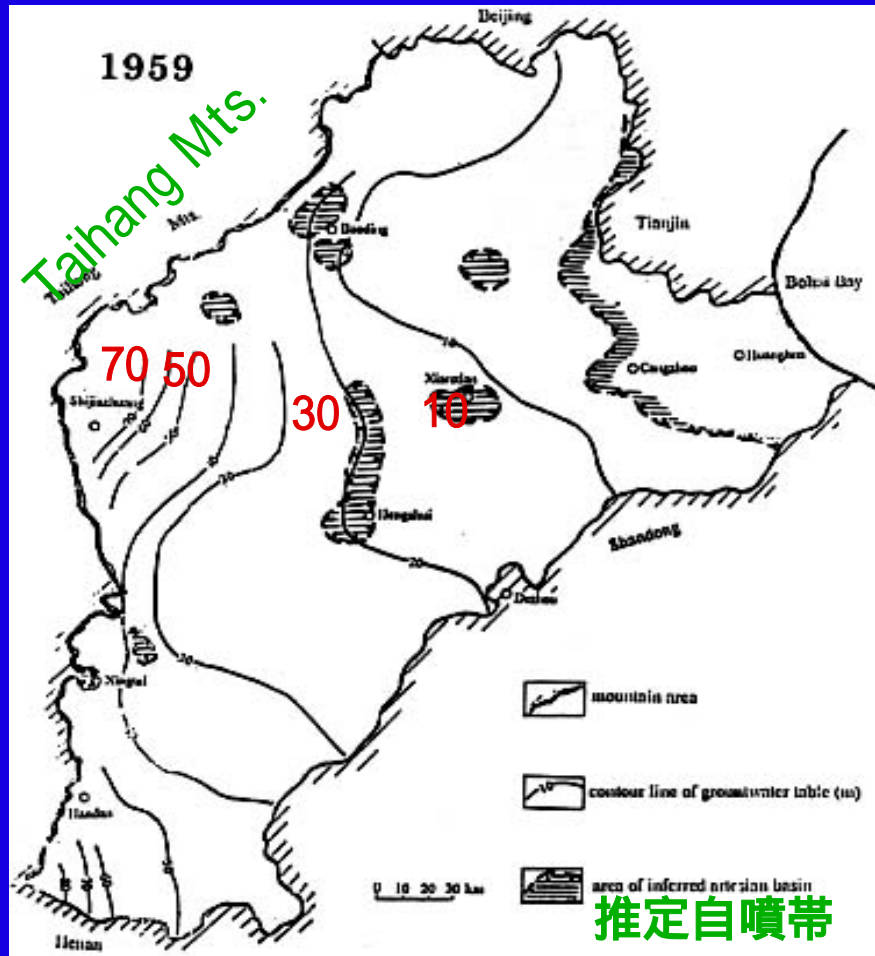
断流の継続時間は徐々に長くなっており、
1995年には122日、1996年には136日に達し、
河口からの無水区間は上流へ700kmも続い
た。1997年には2月7日に断流が始まり、6月は
全月断流、7月には17日間の断流が発生した。
1998年は長江で大洪水が発生したが、河口に
近い利津における断流期間は9月30日時点で
124日に達している。



1997年9月 済南

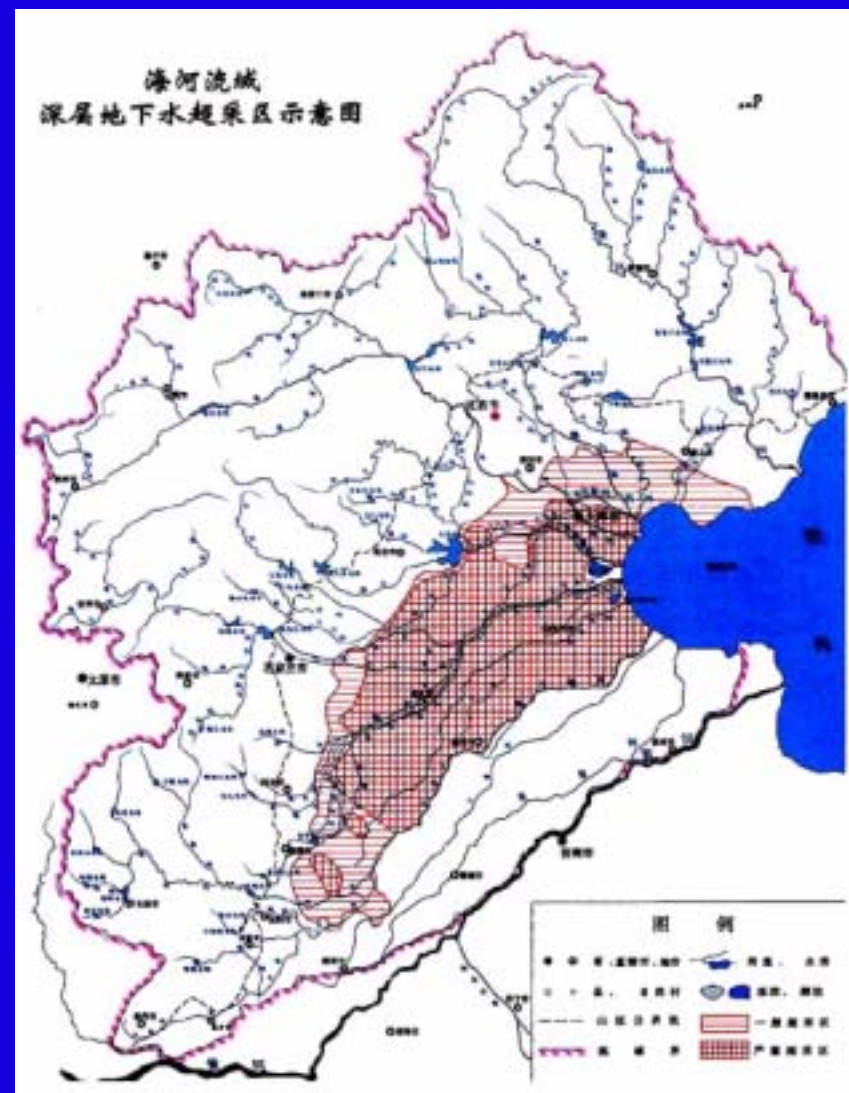
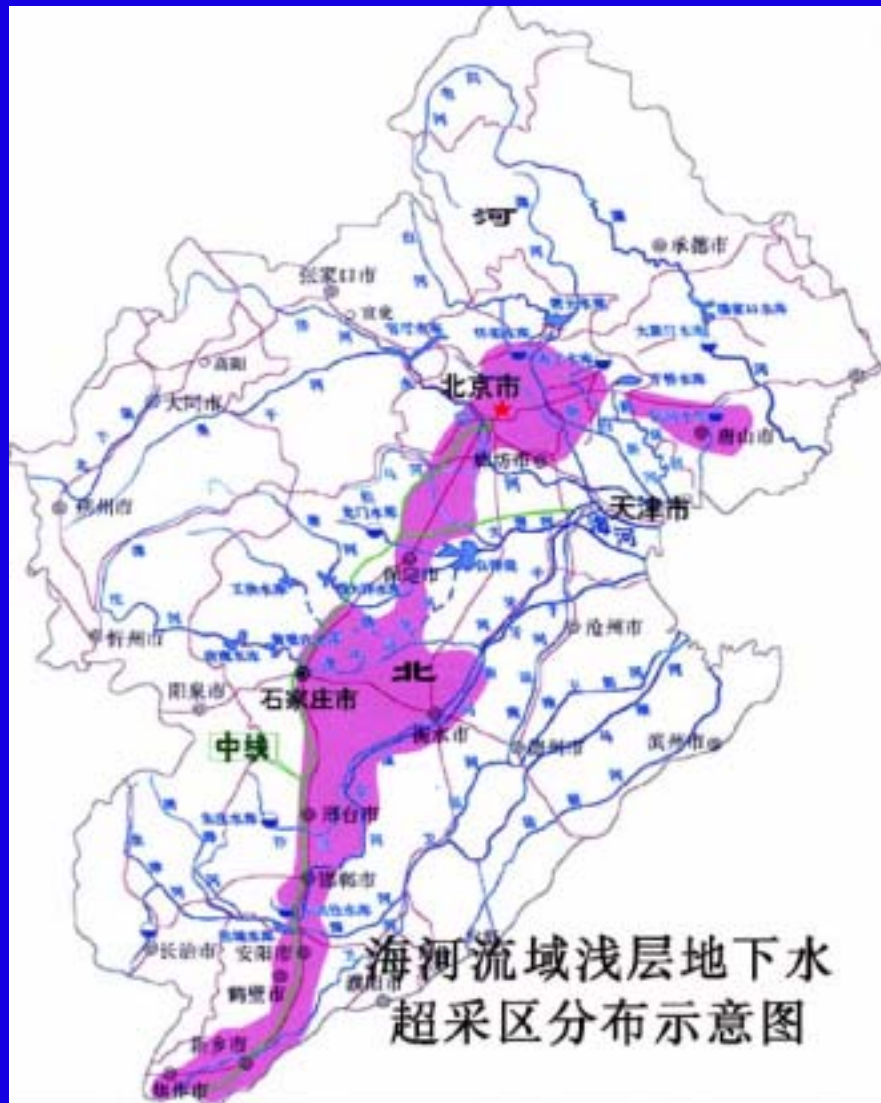


表流水の不足が、地下水位の利用を促した 被圧地下水の水頭分布



(Courtesy of Sun *et al.*(1998), Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAS)

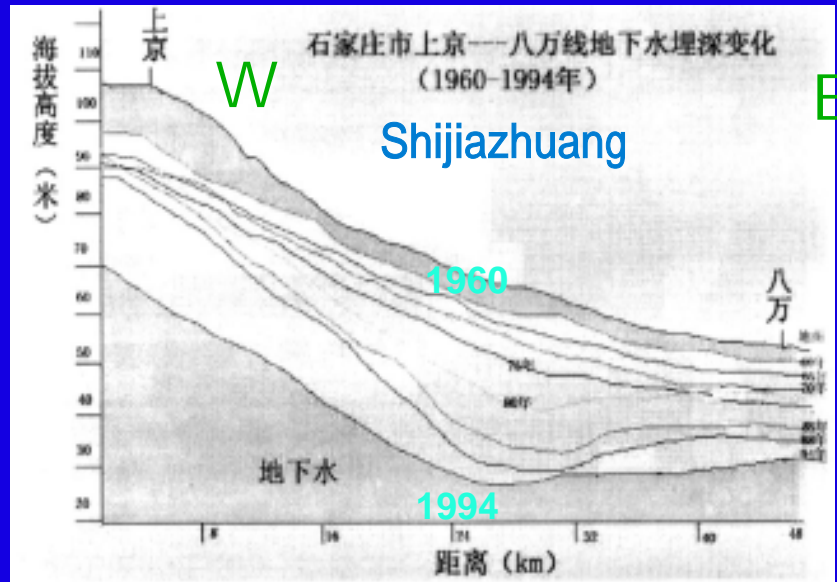
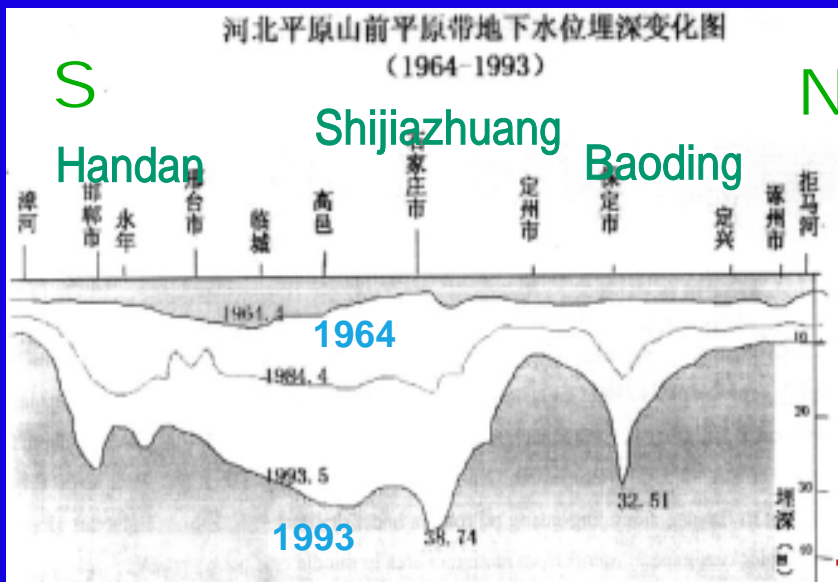
地下水利用の地域性



平原東部では浅層地下水のTDS濃度が高くなるので、利用は深層地下水が主体となる

(Courtesy of Xia Jun, 2002)

山麓平原（山前平原）における地下水位の低下 都市用水の利用



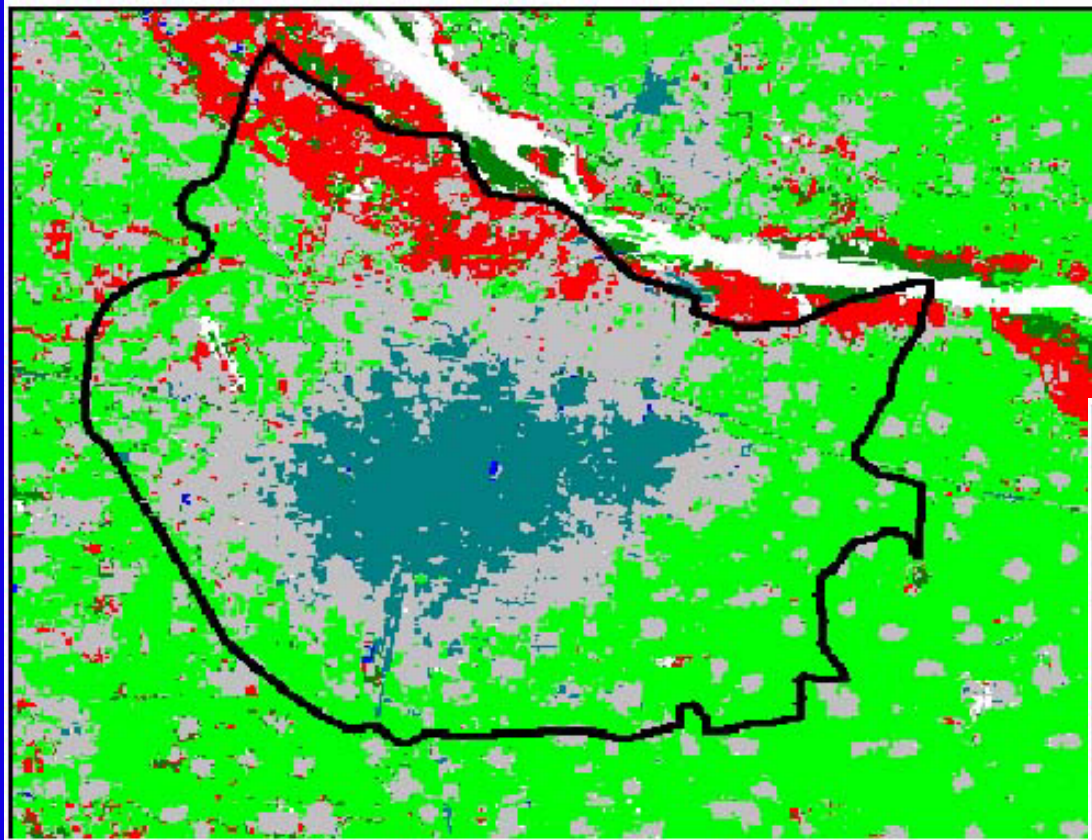
(after Tian *et al.*, 1998)

- 1950年代には華北平原の水運は繁栄していた。しかし、60年代には船が到達可能な河道区間は少なくなり、70年代には舟運は消滅した。太行山地に建設されたダム（水庫）が表流水を堰き止め、平原部は平時には表流水はほとんど流れなくなった
- 小麦の栽培面積は1940年代以降急速に拡大した。同時に地下水位も低下を開始している。地下水は農業用だけでなく工業用水、都市用水としても使われるようになった。石家庄では年間の地下水位低下速度は1.5mに達している。

揚水コストの増加、地盤沈下、汚染、塩性化、海水侵入、...

持続可能な農業は可能か？

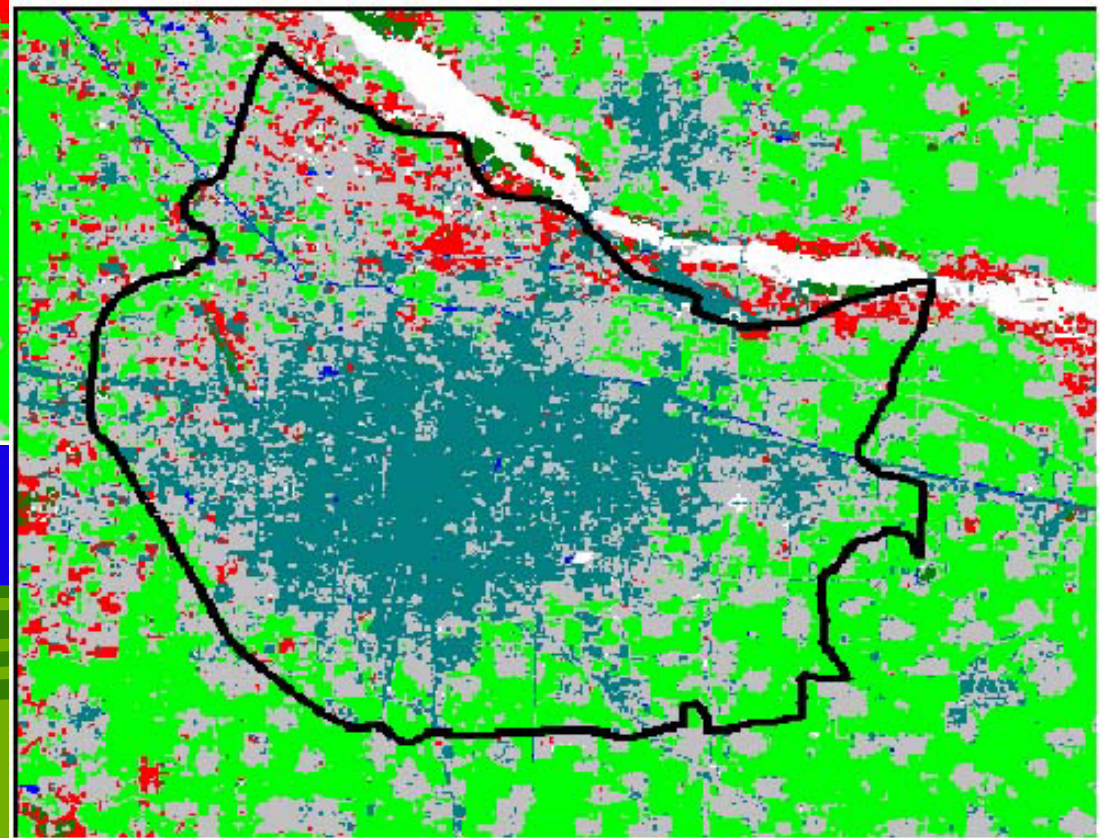
石家庄市街地の土地利用変化 1987-2001



ランドサット5号TMと7号ETM+による
土地地用分類

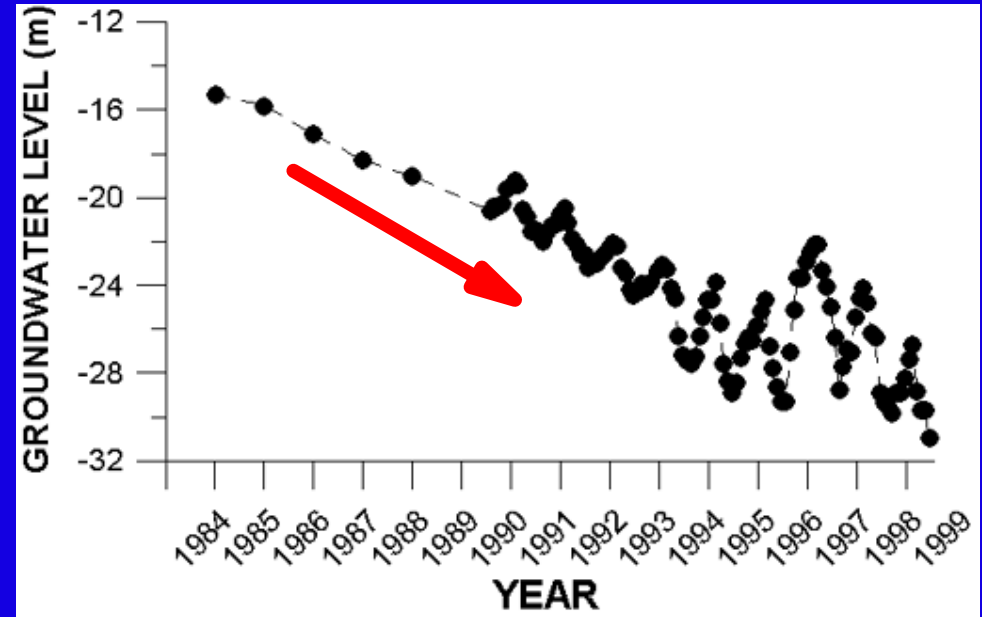
左:1987年

下:2001年



市街地の直径は約18km

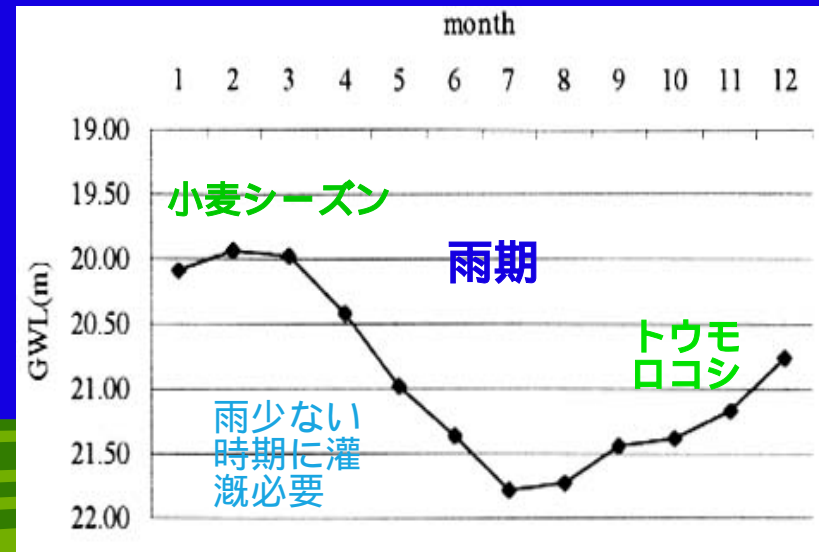
薬城県における地下水位の低下 農業用水



Long time change in GWL



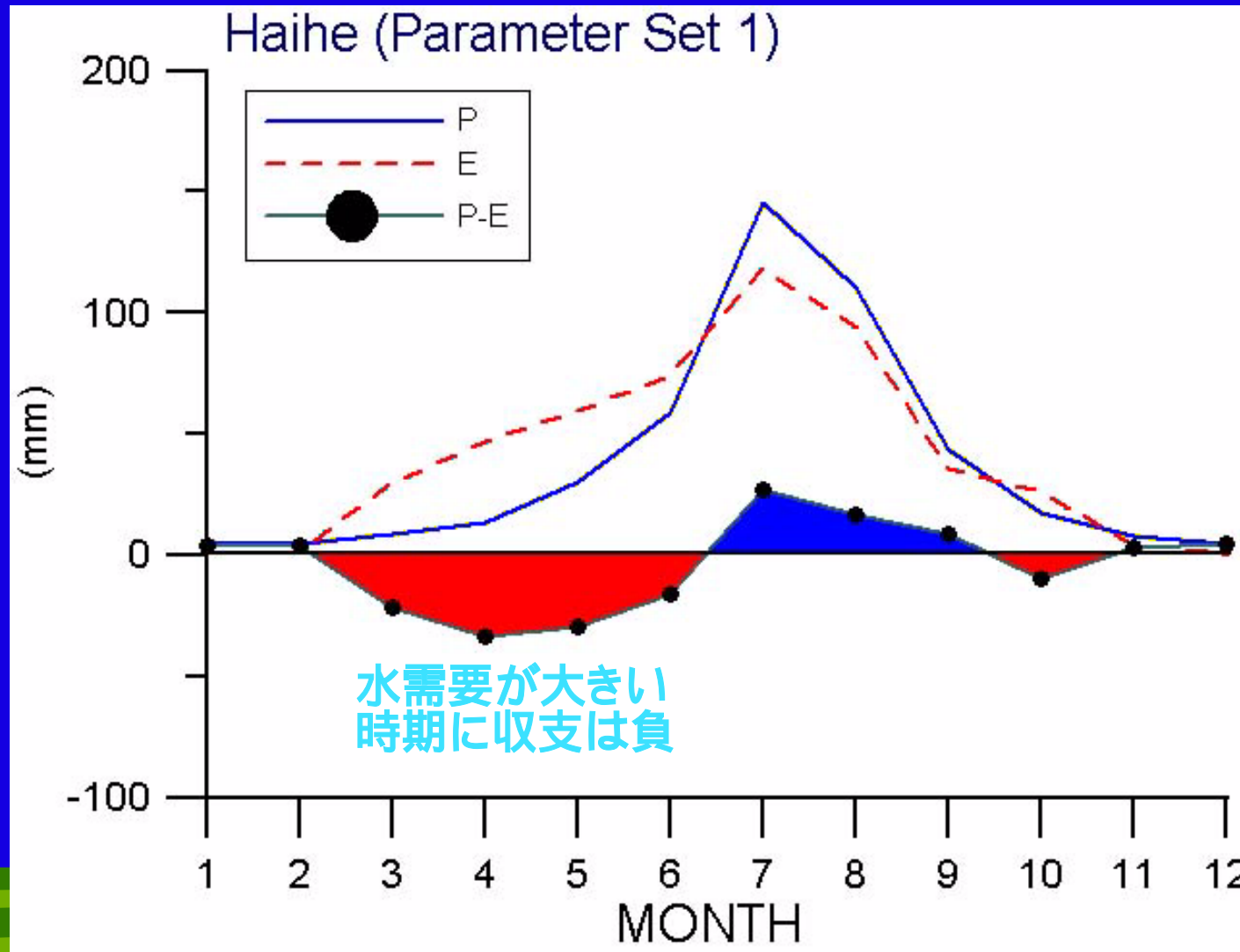
(Wheat field , May,2000)



Seasonal change in GWL

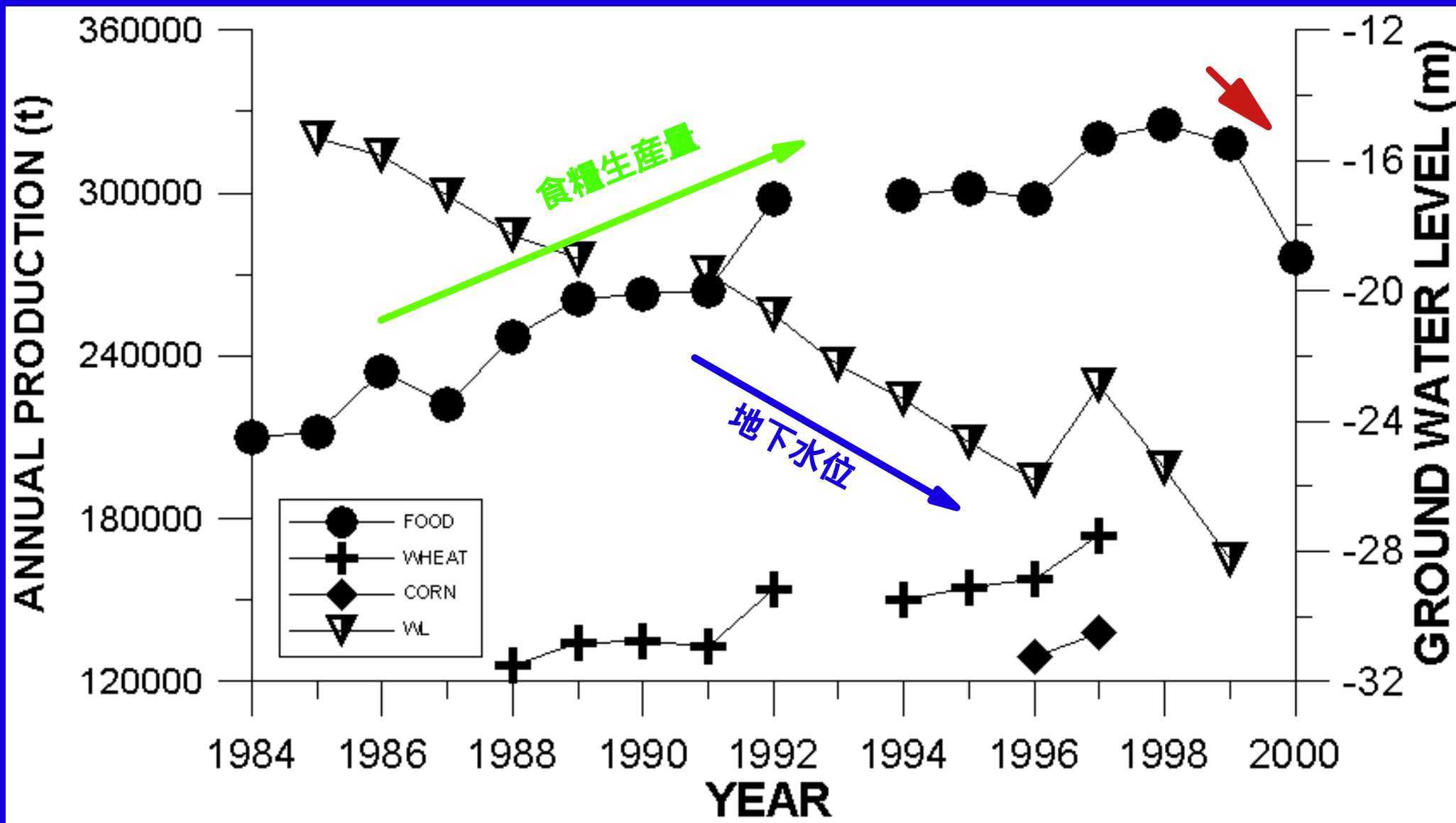
気候学的方法で求めた海河流域の水収支

0.5度分解能のデータセットによって計算したグリッドごとの水収支を海河の流域でオーバーレイして求めた月別水収支



地域の水収支と農事暦

樂城県における食糧生産量と地下水位

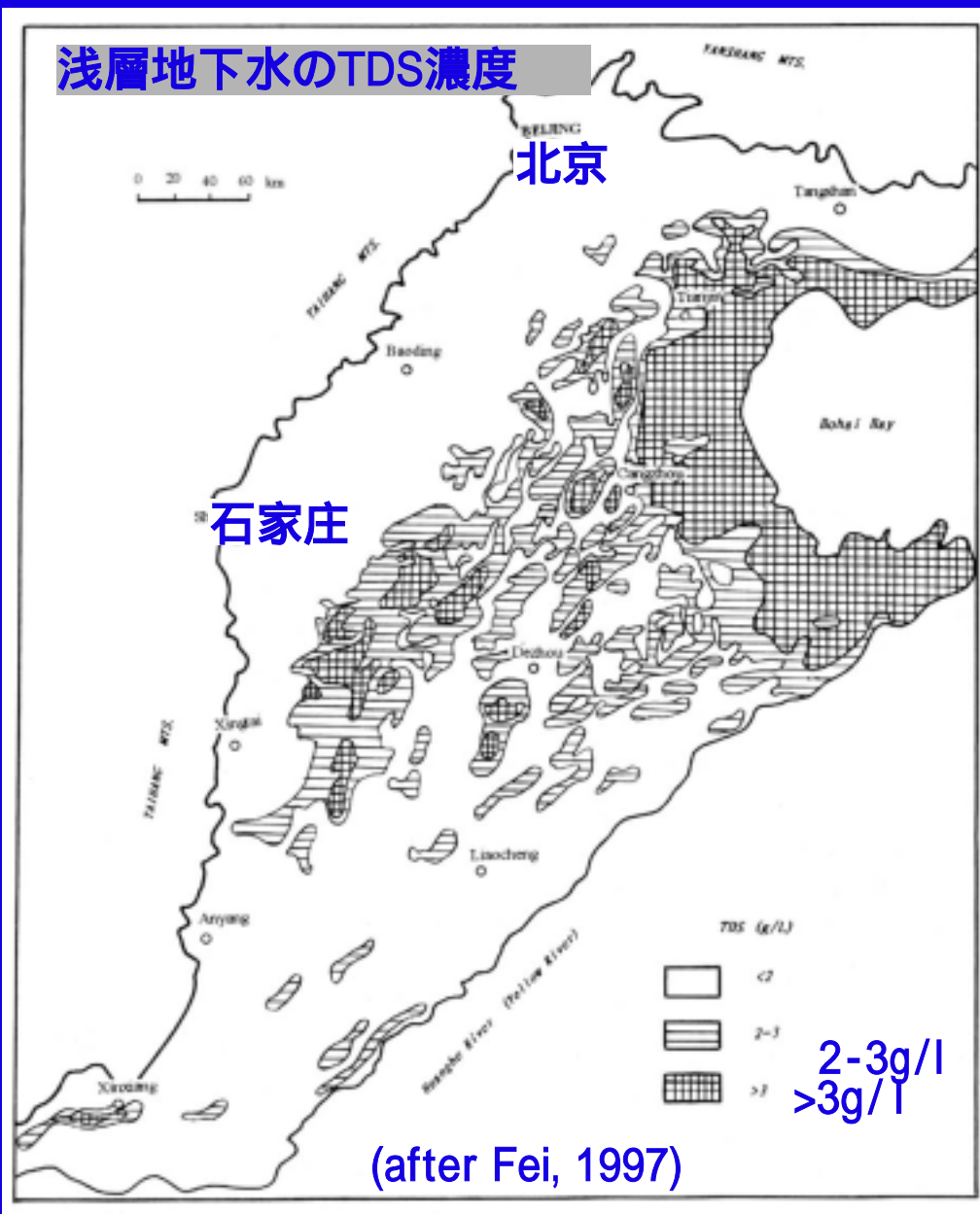


あくまでも平らな華北平原も けっして均質ではない

土地の塩性化

渤海湾沿岸と内陸部に浅層地下水のTDS濃度が高い地域がある。
渤海湾沿岸 - 平原の発達過程で取り込まれた古海水(あるいは広域地下水流動系の流出域)

内陸部 - 河川地形により形成された局地地下水流動系の流出域



左: 渤海湾近くの塩田



右: 滄州近郊の塩性化した土壌

地下水位の低下により塩分が洗い出されて改善された地域もある

コーンの生育期間16, Jun. - 30, Sep.の生産量

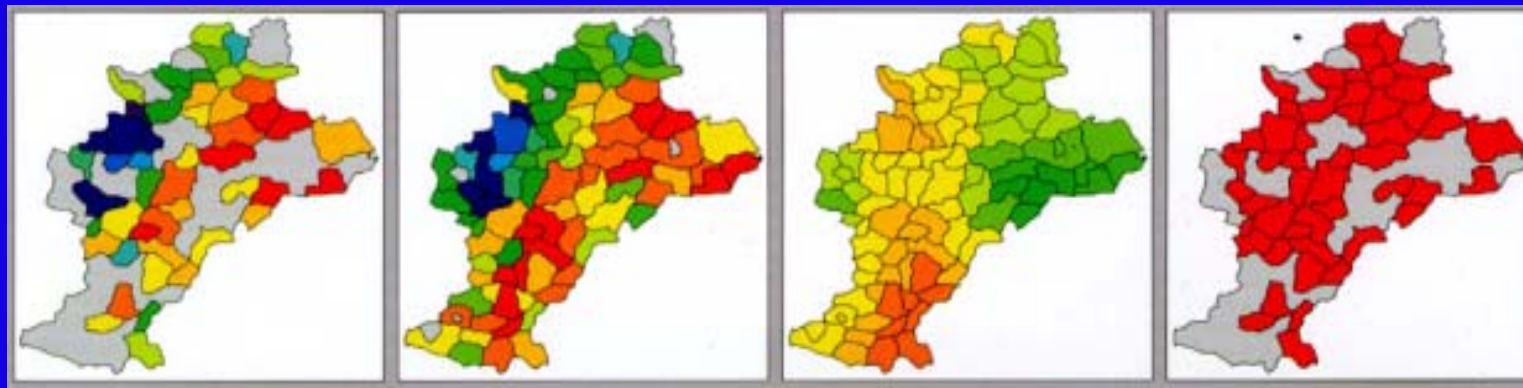
(Courtesy of Zhang Guangluo, Shijiazhuang Institute of Agricultural Modernization, CAS)

水分利用効率
WUE

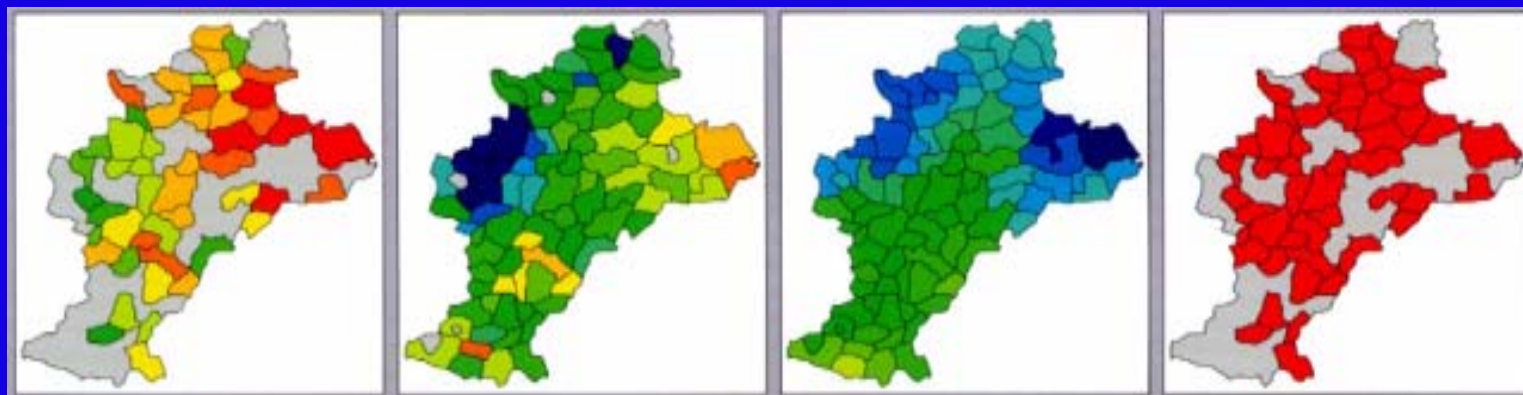
生産量
Production

降水量
Precipitation

灌漑
Irrigation



1992
乾燥年

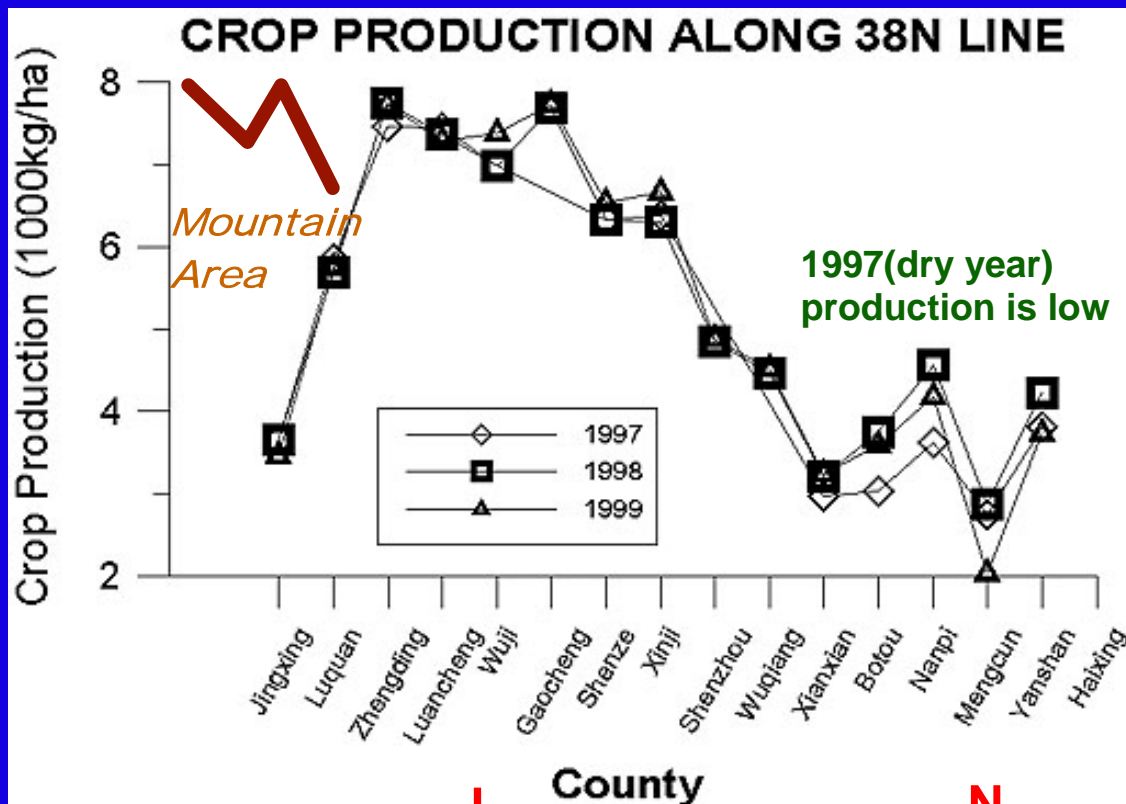


1995
湿潤年

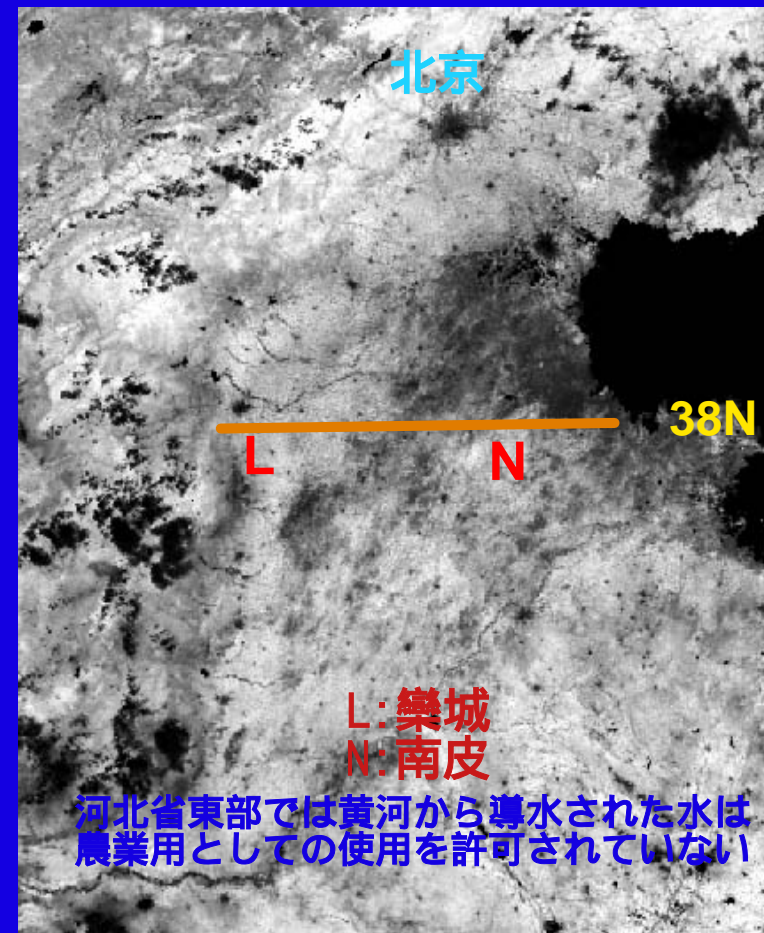
高TDS地下水の分布が穀物の生産に影響を及ぼしている



北緯38度線に沿った穀物 (小麦+トウモロコシ)生産量



(Data from 河北省經濟統計年鑑)



- 山前平原の生産性は高く、旱魃の影響を受けにくい
- 東部、南皮周辺では塩分の影響を受けて生産性が低く、旱魃の影響を受けやすい

水循環によって形成された高TDS帯は食糧生産に影響を与えているが、その状況はリモートセンシングでモニター可能

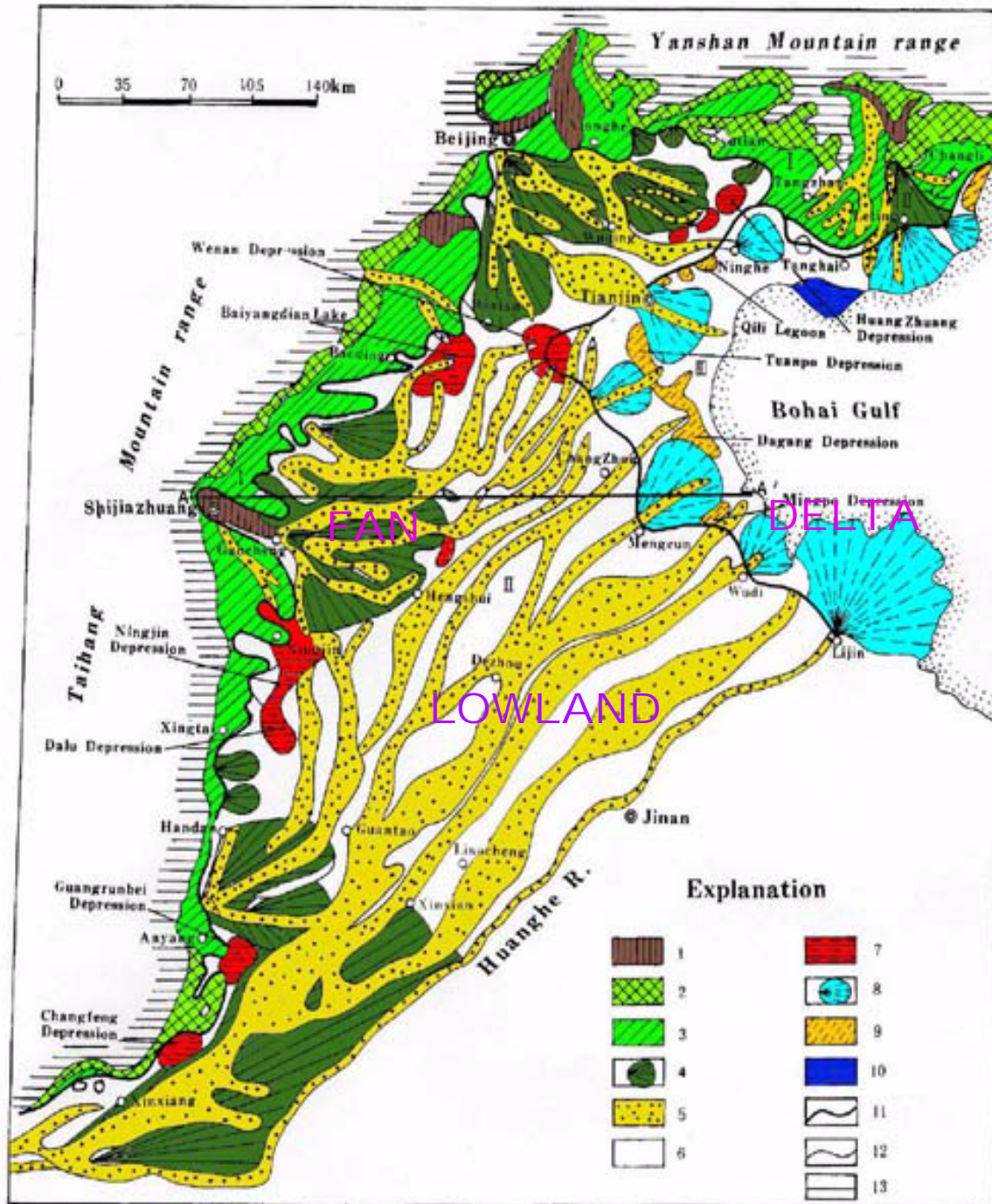
水循環を支配する 華北平原の地形

LEGEND

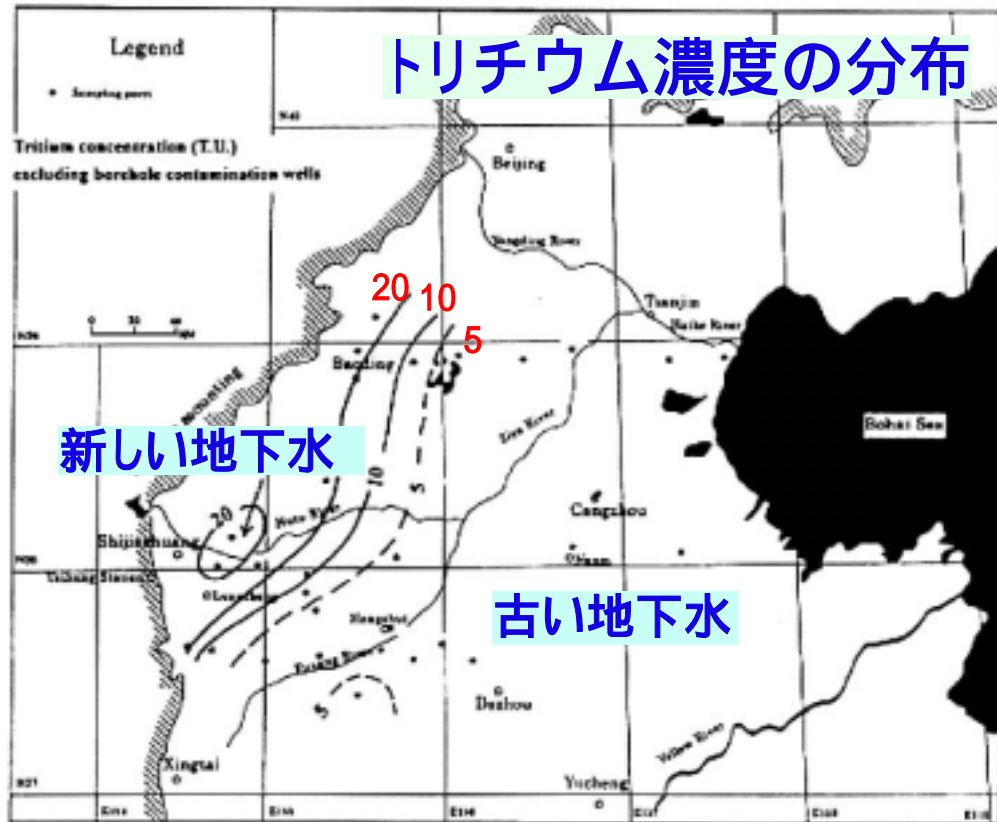
- 3(黄緑): 山麓平原 (山前平原)
- 4(緑): 沖積扇状地
- 5(黄): 旧河道
- 7(赤): 凹地

扇状地の水循環の存在

地形単元が水文学的機能を持ち、その配列によって形成された地下水流動系が、水循環のあり方、水質を決めている



トリチウム濃度の分布

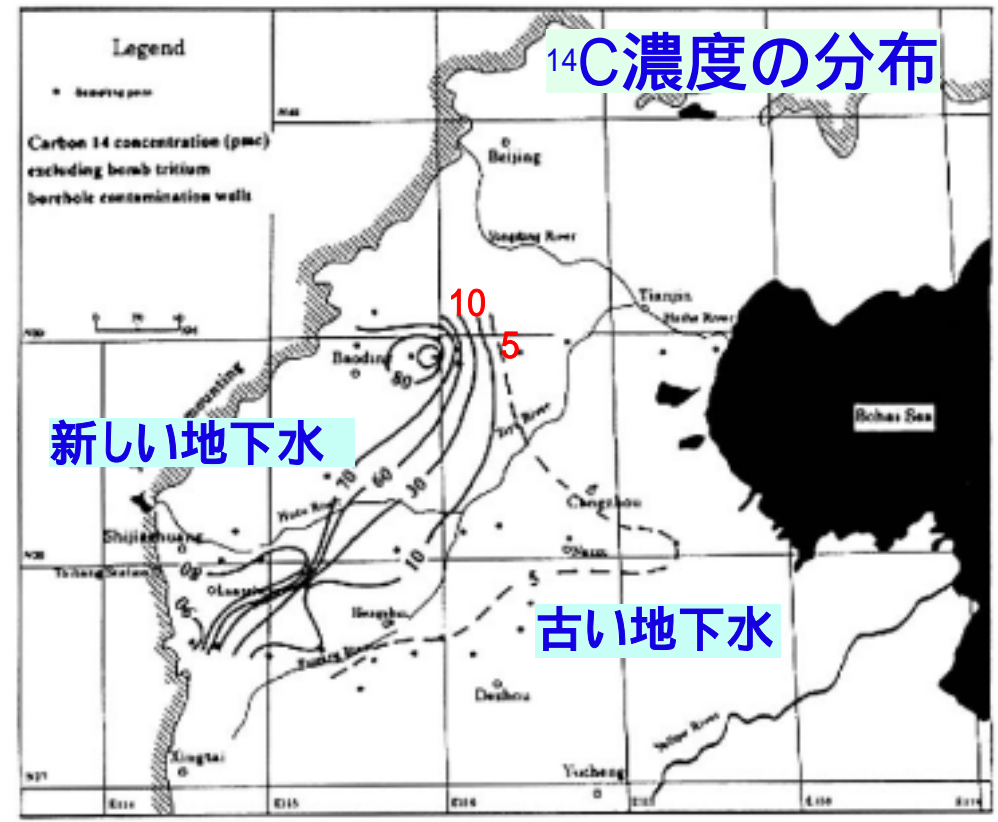


新しい地下水

古い地下水

Distribution of Tritium content for the sampled groundwater

^{14}C 濃度の分布



新しい地下水

古い地下水

Distribution of Carbon 14 content for the sampled groundwater

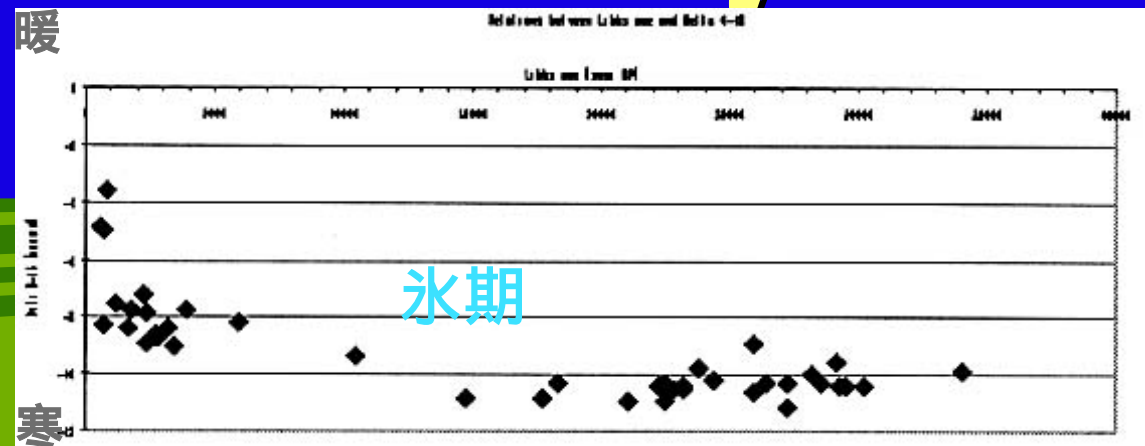
(Shimada et al., 2001)

同位体組成(T , ^{14}C)の分布によると、扇状地の全面にフロントがあるように見える

扇状地の局地地下水流動系の存在を示唆

地下水流動系の階層構造

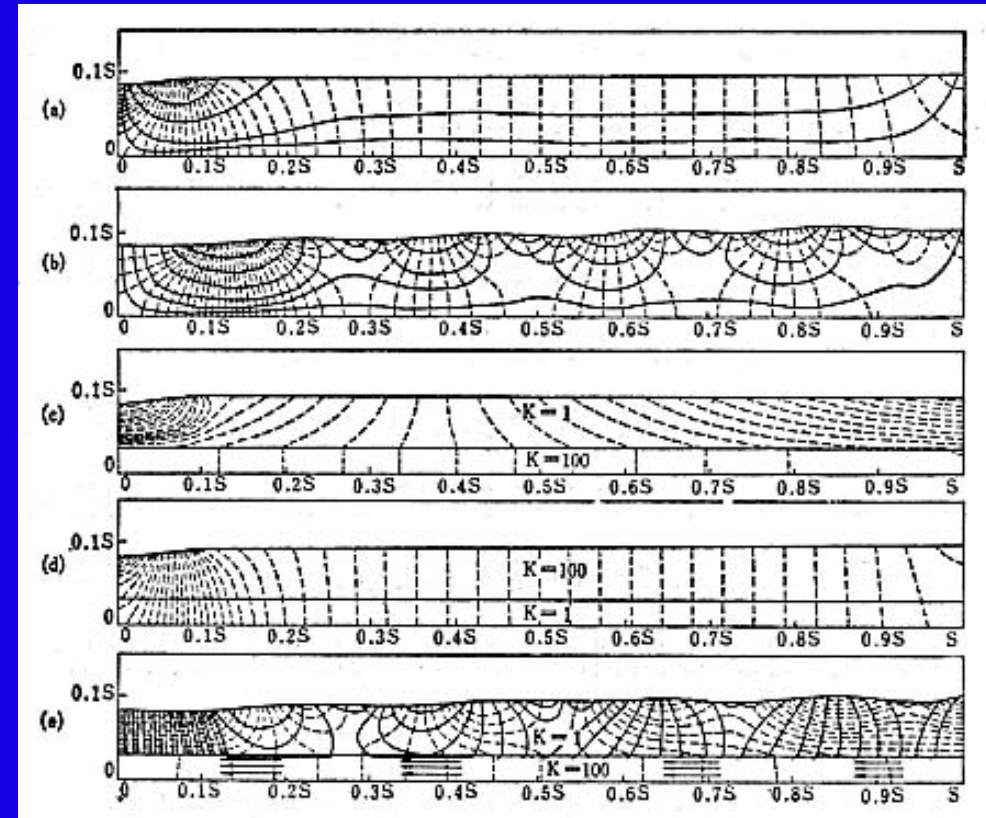
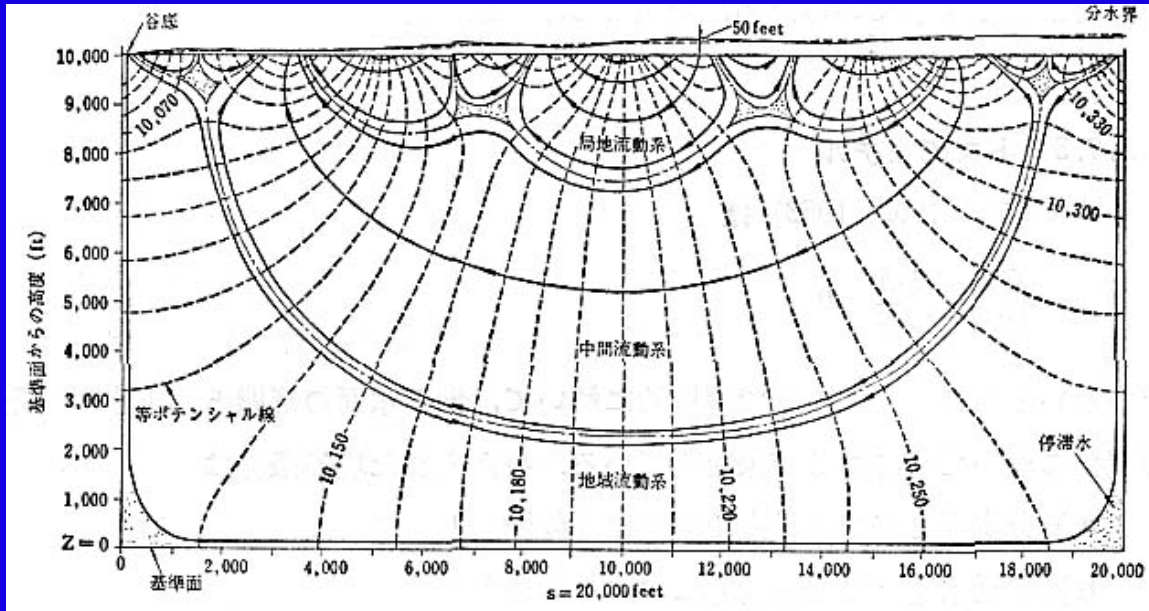
^{14}C 年代と ^{18}O 濃度の関係



暖

寒

地下水流動系の階層構造

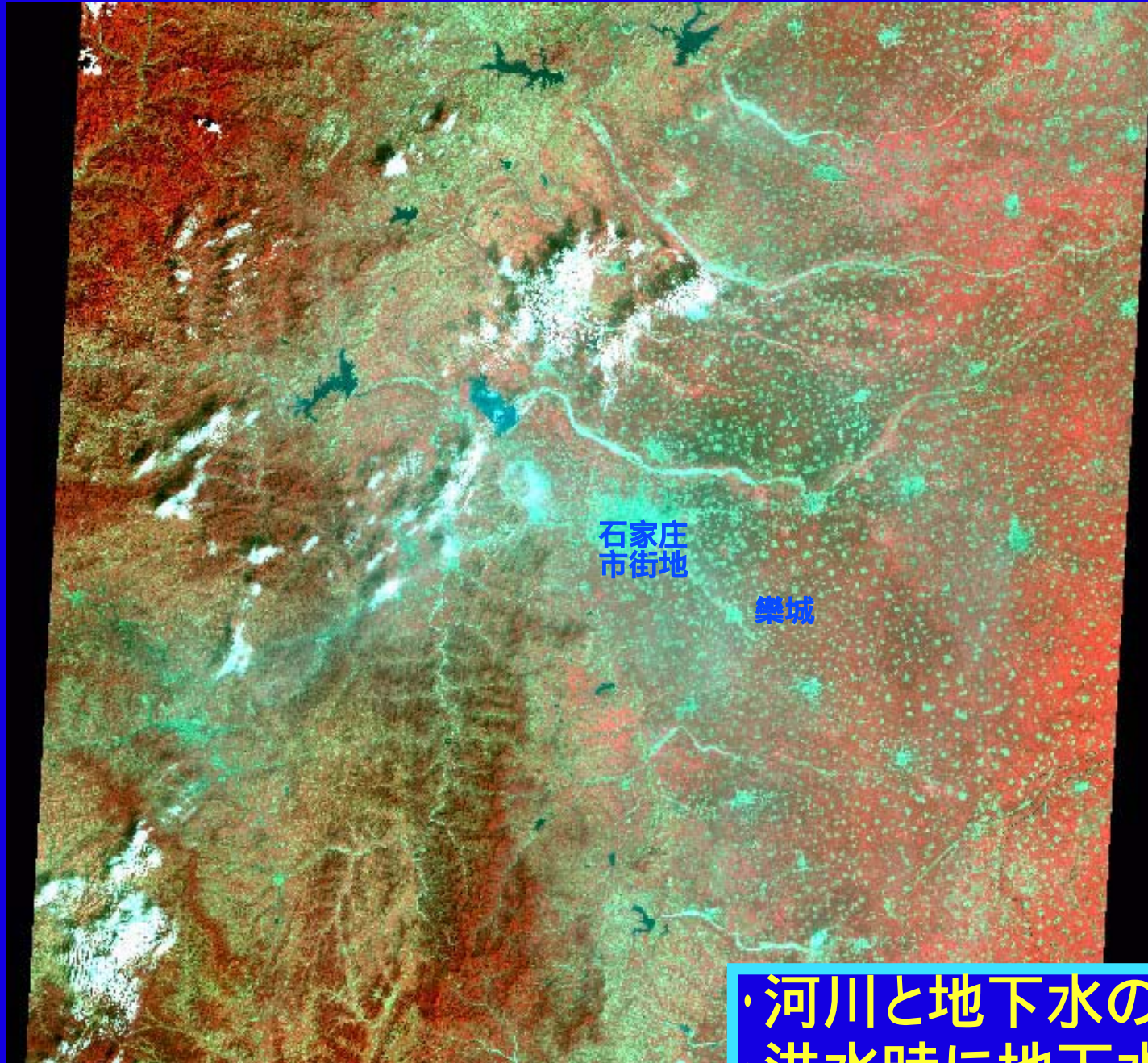


地層が均質でも、地下水面の起伏によって**局地・中間・地域**地下水流動系の階層構造が形成される(上: Toth)
 地質は地下水流動系を修飾する(右: Freeze)

- ・地形によって形成されるポテンシャル差は地下水流動系の階層構造を形成する
- ・地質はそれを修飾する



石家州市近郊LANDSAT7 ETM+



太行山の山麓に多数のダム(水庫)が並んでいる

これらのダムによって平原部の河川には普段は水はない

扇状地の水循環が遮断されている

供給を断ちながら、水を使っている可能性

- ・河川と地下水の交流関係
- ・洪水時に地下水涵養はあるのか？

水汚染

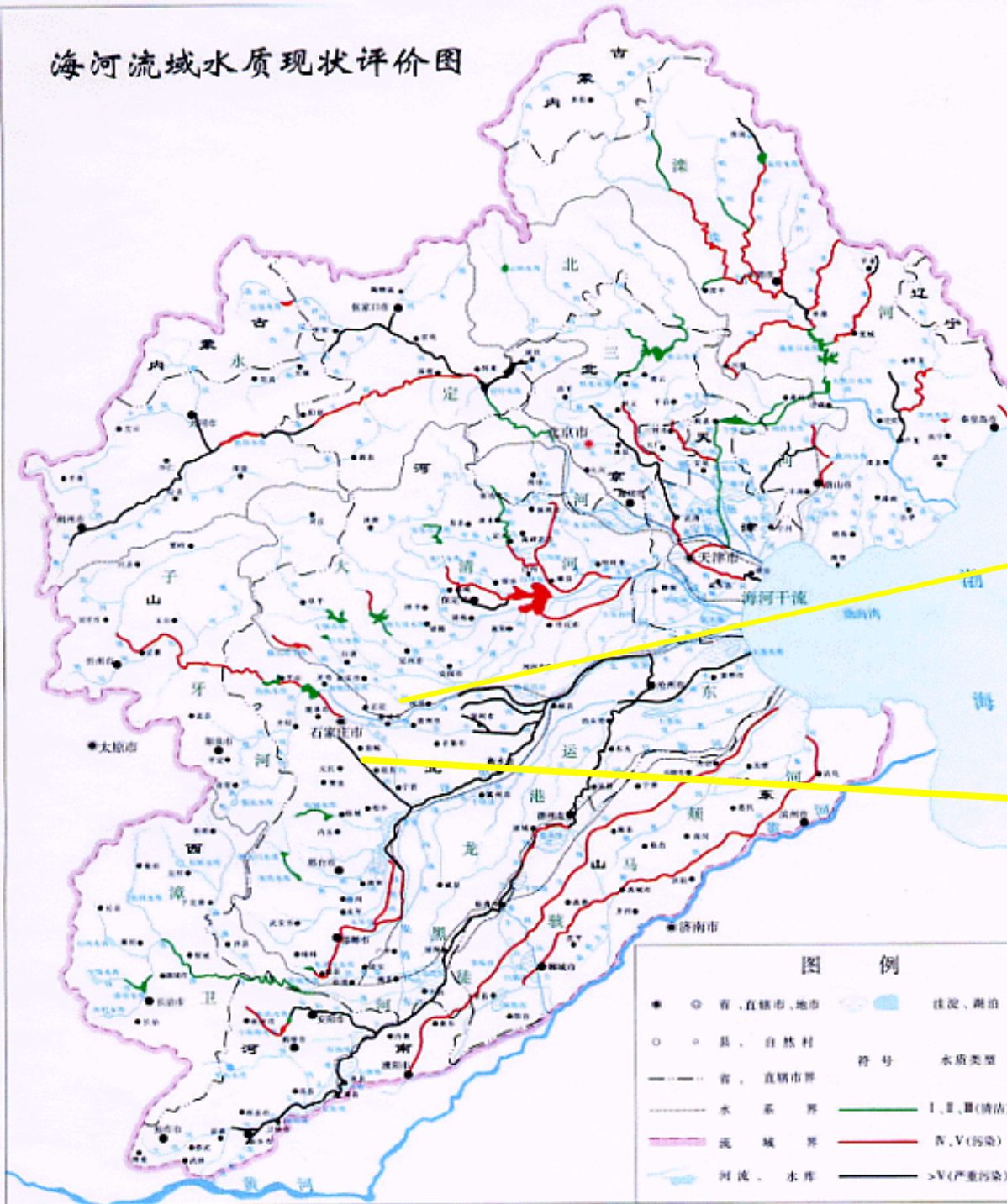
都市排水が十分な処理を
されないまま河川に排水



灌漑用水として利用
・汚水灌漑

赤: 汚染
黒: 重度汚染

海河流域水质现状评价图

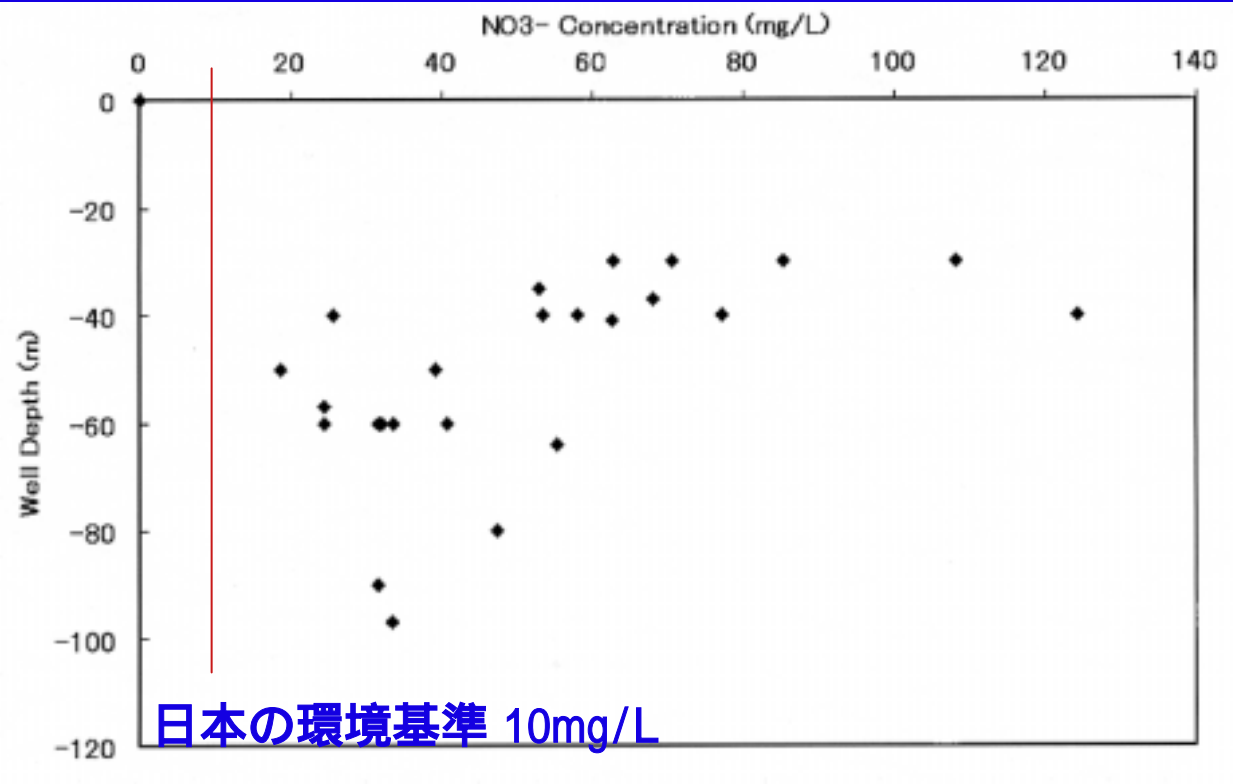


(謝謝 中国科学院夏軍先生)

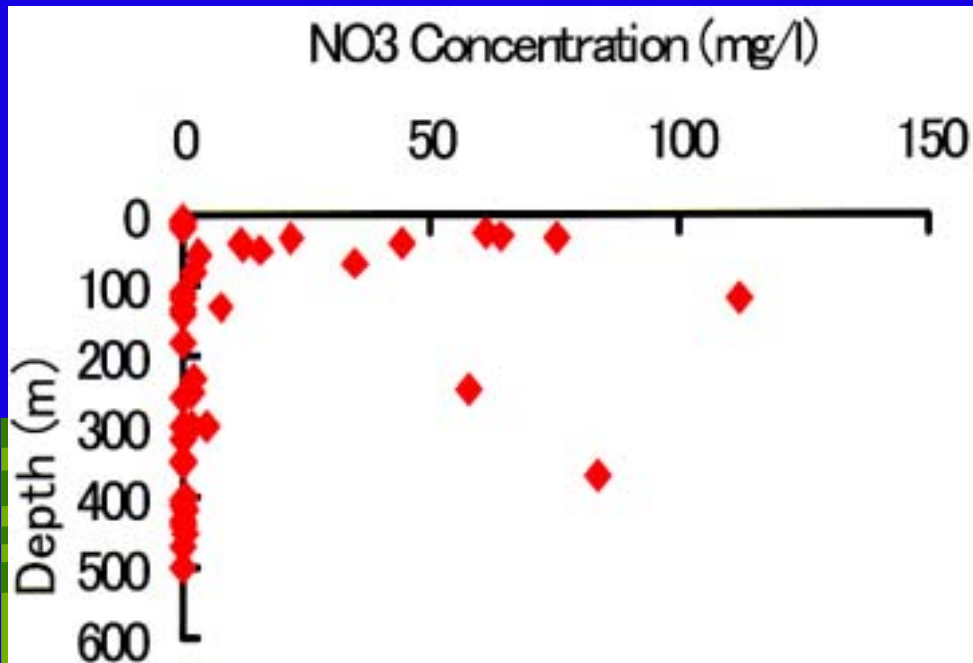
汚水灌漑

石家庄下流の汚水灌漑を行っている地域の硝酸態窒素濃度と井戸深度の関係

汚水灌漑を行っている地域の濃度は地下水灌漑地域と比べて高い



日本の環境基準 10mg/L



華北平原(河北省～山東省北部域)における硝酸態窒素濃度と井戸深度の関係

・施肥 河北省経済統計年鑑による解析



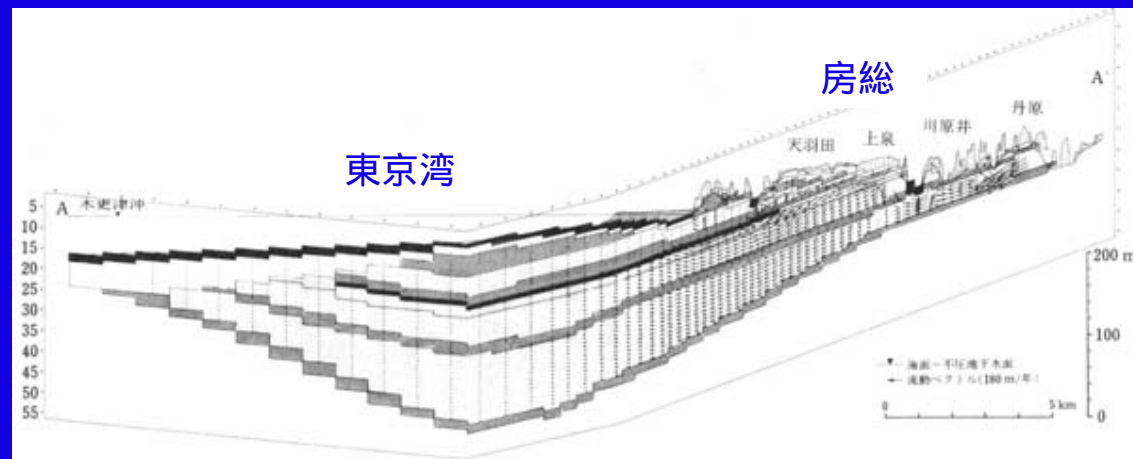
日本の経験は生かせるか

帯水層は陸地で地表に露出する

関東平野の将棋倒し構造

堆積盆地縁辺部に低位の地層が露出し、地下水涵養域となる

1970年代に最低水位を記録した東京の地下水位は揚水規制後、急速に水位を回復させた

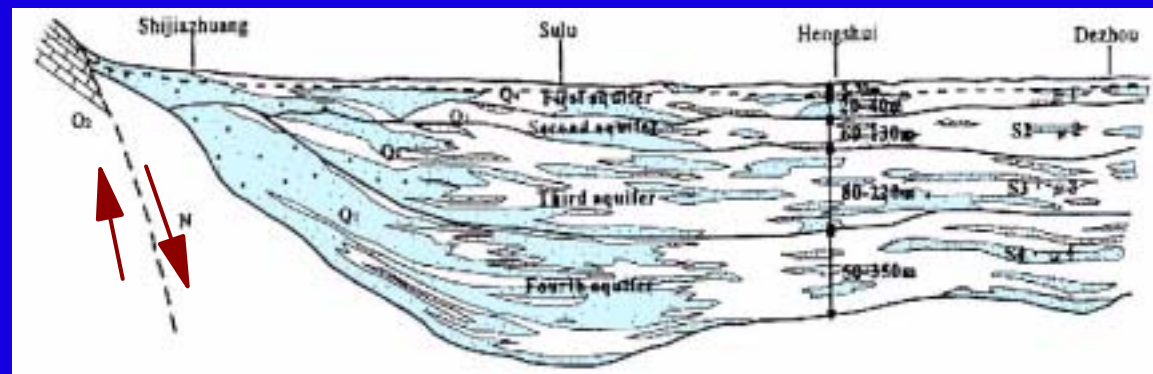


(地下水資源環境論より)

華北平原のアバット構造

低位の地層が露出しないため地下水涵養が困難？

華北平原では揚水規制が行われたとしても水位はどの程度回復するだろうか？



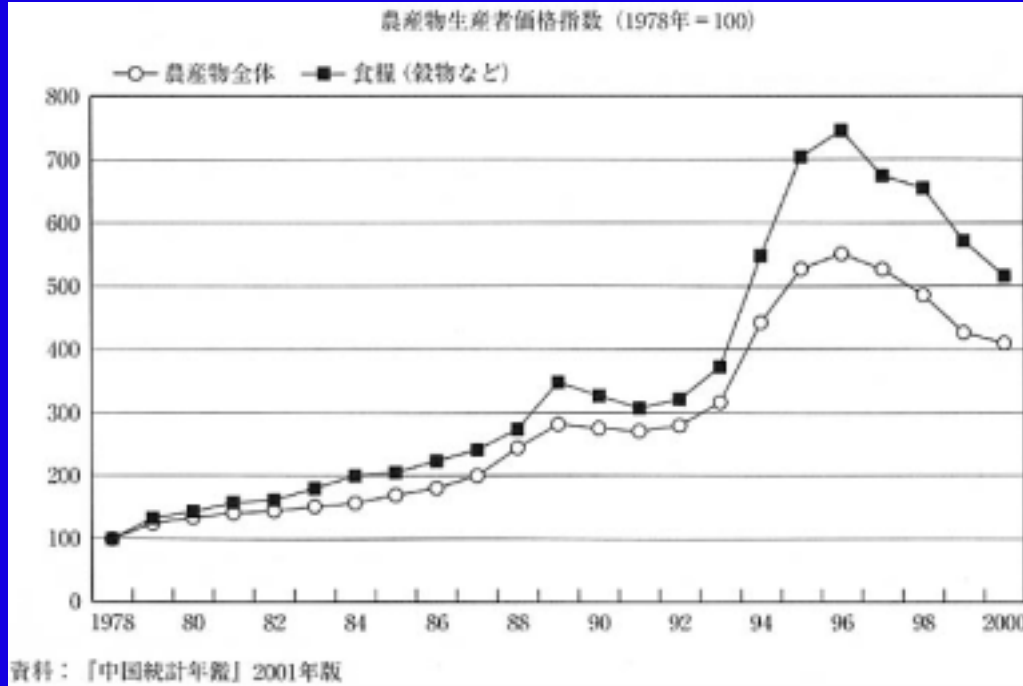
(Zhu *et al.*, 1992)

地表水と地下水の交流関係は？

定量的な評価が困難な課題に対しては他地域との比較によって指針を得る比較水文学の手法が有効である



水は食糧生産の制約要因になるか？



(池上、2002)

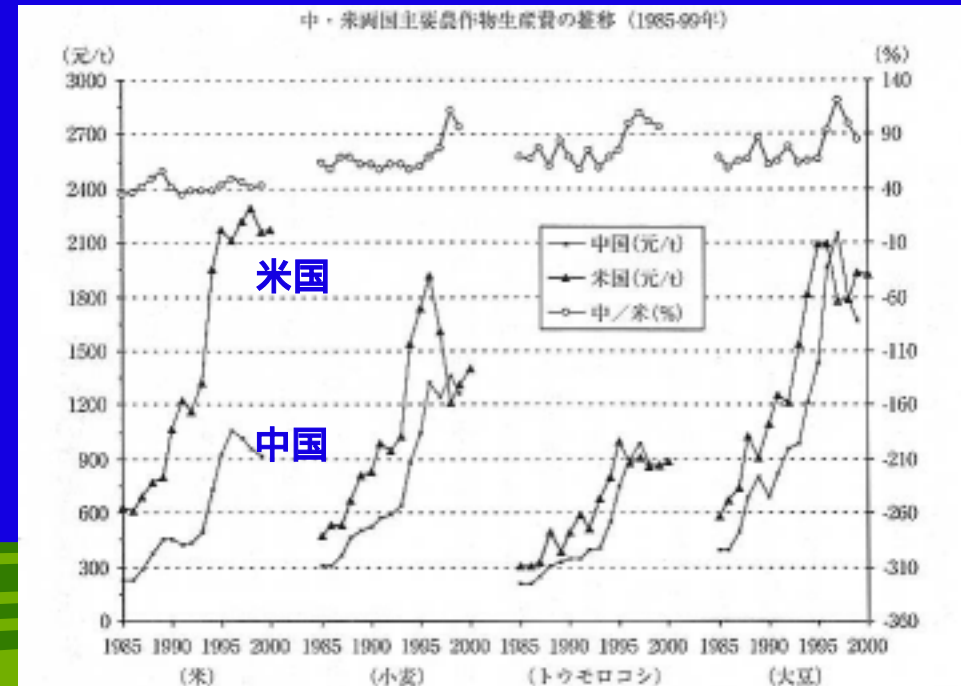
96年以降農産物の価格は下がっている(左)

その頃から農産物生産費は頭打ちになっている(下)

(沈、2002)

生産費に占める揚水のコストも上がって来ているはず

その影響は？



資料：中国発展計画委員会等編『全国農産物費用収益資料集』各年版と <http://www.ers.usda.gov/data/costandreturns> より作成。
注：ドルから元への換算は各年年平均中間レートを使用した。その値は表4と同じである。

まとめ

地下水水循環の実態を知ること

- ・地下水流動系の階層構造
- ・地表水、大気との交流

何が問題か、がわかる

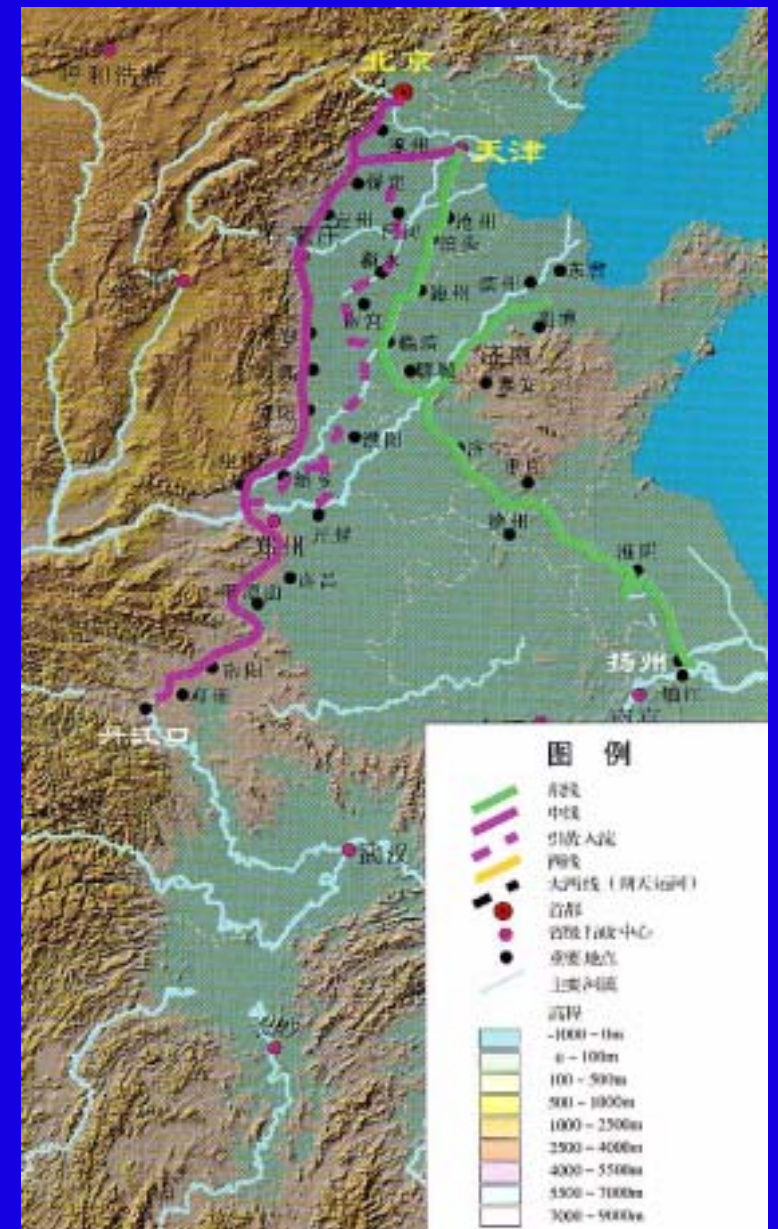
- ・自然の水循環の遮断
- ・滞留時間の長い地下水の利用

社会経済的条件との関わり

- ・食糧価格と営農コスト

グローバルの中に位置付け

- ・比較水文学の枠組みの重要性
- ・知的資産を形成する仕組み



南水北調により、水がやってきたとき、どのような水利用が好ましいだろうか？

